Максим Дмитриевич Иванов
Maksim D. Ivanov

*студент кафедры
«Электротехника и
электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*

Регина Тагировна Хазиева
Regina T. Khazieva

*кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электротехника
и электрооборудование предприятий»,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
Уфа, Россия*

УДК 621.3

DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-5-14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Актуальность

Обводнение нефти приводит к различным негативным последствиям, но, пожалуй, самыми значимыми среди них можно назвать высокую стоимость транспортирования обводненной нефти и отрицательное воздействие воды и содержащихся в ней солей на качество получаемых нефтепродуктов после переработки. Существуют различные методы разрушения водонефтяных эмульсий: термические, химические, электрические и другие. Среди электрических методов также можно выделить использование постоянных электрических полей, постоянных магнитных и переменных электромагнитных полей, воздействие которых различными способами на эмульсию приводит к ее разрушению. Однако любой из этих методов и технических решений не лишен своих недостатков: в одних используют достаточно дорогие деэмульгаторы, другие требуют значительного времени для деэмульсации нефти или обладают низкой эффективностью. В предыдущих статьях авторами данной работы был предложен метод обезвоживания водонефтяных эмульсий, основанный на комплексном применении постоянного магнитного поля и высокочастотных импульсных электромагнитных полей, а также были выбраны оптимальные параметры и электрическая схема питания устройства, предназначенного для генерации постоянного магнитного поля.

Цель исследования

В данной статье рассматриваются параметры устройства для обработки водонефтяной эмульсии в переменном импульсном электромагнитном поле. Основными задачами являются приведение электрической схемы преобразований формы, амплитуды и частоты напряжения к требуемым, согласно технологическому процессу, значениям, которые бы обеспечили наивысшую эффективность процесса обезвоживания эмульсии, а также моделирование работы такого устройства.

Методы исследования

В данном исследовании были использованы следующие методы: патентный обзор, изучение научной литературы, математический анализ и моделирование.

Результаты

Определены основные требования, предъявляемые к устройству, предназначенному для генерации импульсных электромагнитных полей для обезвоживания водонефтяных эмульсий, изучены переходные процессы, протекающие при подаче управляющих импульсов на полупроводниковые коммутационные аппараты, разработана математическая модель устройства и проведен анализ его работы. Полученные результаты необходимы для создания лабораторной установки для проведения натурных экспериментов, разработки системы управления тиристорами. В дальнейшем планируется проведение экспериментов, направленных на изучение эффективности применения импульсного электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяных эмульсий.

Ключевые слова: импульсное электромагнитное поле, обезвоживание водонефтяных эмульсий, оптимизация технологического процесса, полупроводниковые элементы, повышенная энергетическая эффективность

MODELING AN AC VOLTAGE GENERATOR TO CREATE A PULSE ELECTROMAGNETIC FIELD

Relevance

Watering oil leads to various negative consequences, but perhaps the most significant among them are the high cost of transporting water-cut oil and the negative impact of water and the salts it contains on the quality of the resulting oil products after refining. There are various methods of destruction of water-oil emulsions: thermal, chemical, electrical and others. Among the electrical methods, one can also highlight the use of constant electric fields, constant magnetic and alternating electromagnetic fields, the effect of which in various ways on the emulsion leads to its destruction. However, any of these methods and technical solutions is not without its drawbacks: in some, rather expensive demulsifiers are used, while others require a significant time to demulsify oil or have low efficiency. In previous articles, the authors of this work proposed a method for dehydration of oil-water emulsions, based on the complex application of a constant magnetic field and high-frequency pulsed electromagnetic fields, and also selected the optimal parameters and an electrical circuit for powering a device designed to generate a constant magnetic field.

Aim of research

This article discusses the parameters of a device for processing an oil-water emulsion in an alternating pulsed electromagnetic field. The main task is to determine the electrical circuit for converting the shape, amplitude and frequency of the voltage to the values required, according to the technological process, that would provide the highest efficiency of the emulsion dehydration process, as well as modeling the operation of such a device.

Methods

In this study, the following methods were used: patent review, study of scientific literature, mathematical analysis and modeling.

Results

The basic requirements for a device designed to generate pulsed electromagnetic fields for dehydration of water-oil emulsions were determined, transient processes occurring when control impulses were applied to semiconductor switching devices were studied, a mathematical model of the device was developed and its operation was analyzed. The results obtained are necessary for the creation of a laboratory setup for carrying out field experiments, the development of a thyristor control system. In the future, it is planned to conduct experiments aimed at studying the effectiveness of using a pulsed electromagnetic field for dehydrating oil-water emulsions.

Keywords: pulsed electromagnetic field, dehydration of oil-water emulsions, optimization of the technological process, semiconductor elements, increased energy efficiency

Обводнение нефти приводит к различным негативным последствиям, но, пожалуй, самыми значимыми среди них можно назвать высокую стоимость транспортирования обводненной нефти и отрицательное воздействие воды и содержащихся в ней солей на качество получаемых нефтепродуктов после переработки. Существуют различные методы разрушения водонефтяных эмульсий: термические, химические, электрические и другие [1]. Среди электрических методов также можно выделить использование постоянных электрических полей, постоянных магнитных и переменных электромагнитных полей, воздействие которых различными способами на эмульсию приводит к ее разрушению. Однако любые из этих методов и технических решений не лишены своих недостатков: в одних используют достаточно дорогие деэмульгаторы, другие требуют значительного времени для деэмульсации нефти или обладают низкой эффективностью [2].

В предыдущих статьях авторами данной работы был предложен метод обезвоживания водонефтяных эмульсий, основанный на комплексном применении постоянного магнитного поля и высокочастотных импульсных электромагнитных полей [3], а также были выбраны оптимальные параметры и электрическая схема питания устройства, предназначенного для генерации постоянного магнитного поля [4].

В данной статье рассматриваются параметры устройства для обработки водонефтяной эмульсии в переменном импульсном электромагнитном поле. Основными задачами являются определение электрической схемы преобразования формы, амплитуды и частоты напряжения к требу-

емым, согласно технологическому процессу, значениям, которые бы обеспечили наивысшую эффективность процесса обезвоживания эмульсии, а также моделирование работы такого устройства.

Согласно данным патента 2167692 «Способ обезвоживания водонефтяной эмульсии» [5], при сближении поляризованных капель в электрическом поле из-за проводимости нефти имеет место нейтрализация поляризационных зарядов капель с постоянной времени порядка $\tau = (1-5) \cdot 10^{-4}$ с, которая много меньше полупериода колебаний синусоидального электрического поля (0,01 с). В результате электрическое поле обеспечивает эффективное сближение капель только до расстояний порядка $0,1 \cdot r$.

Длительность переднего фронта импульса напряженности на этапе предварительных расчетов примем в пределах $\tau_{\Phi} = (2-5) \cdot 10^{-4}$ с.

Верхний предел определяется постоянной времени τ , а нижний предел определяется тем, что при $\tau_{\Phi} < 2 \cdot 10^{-4}$ с эффективность слияния капель уже не повышается, однако удорожается аппаратура, необходимая для реализации способа.

Оптимальное действующее значение напряженности поля будет находиться в пределах (0,2–0,4) кВ/см.

Лабораторная установка рассчитывается на объем 5 л, при этом её диаметр составит 14 см.

В этом случае действующее значение напряжения составит:

$$U_d = d \cdot E_d = 14 \cdot 0,3 = 4,2 \text{ кВ}, \quad (1)$$

где d — диаметр установки, м;

E_d — действующее значение напряженности поля.

В патентах и статьях, посвященных данной тематике, указаны различные значения рекомендуемой частоты перемен-

ного тока, с помощью которого необходимо создавать электрическое поле требуемой напряженности [6–8]. Поэтому в проектируемой экспериментальной установке необходимо будет изменять частоту подаваемого тока для проведения необходимых экспериментов.

Предполагается, что высокочастотные поля обеспечивают коалесценцию более мелких капель воды, менее высокочастотные — средних и более крупных капель. Поэтому обработку водонефтяной эмульсии планируется осуществлять в 3 этапа с использованием импульсных электрических полей различных частот. Частоту для проведения экспериментов будем менять в диапазоне от 5000 Гц для самых мелких капель до 50 Гц — для крупных капель.

Идеализированный выходной сигнал генератора переменного импульсного напряжения представлен на рисунке 1.

Таким образом, к генератору предъявляются следующие требования:

1. обеспечивать выходной сигнал в соответствии с рисунком 1;
2. обеспечивать длительность переднего фронта импульса напряженности в пределах $\tau_{\phi} < 5 \cdot 10^{-4}$ с;
3. обеспечивать действующее значение напряжения $U_d = 4,2$ кВ, а, следовательно, амплитудное $U_M \approx 2\sqrt{2}U_d = 2\sqrt{2} \cdot 4,2 = 11,9$ кВ;

Рисунок 1. Выходное напряжение генератора

Figure 1. Generator output voltage

4. обеспечивать регулирование частоты выходного напряжения в широком диапазоне от 50 до 5000 Гц.

Определим характер нагрузки. Электроды, расположенные внутри электродегидратора, образуют параллельно соединенную емкость C и сопротивление R , которое определяется проводимостью эмульсии в межэлектродном пространстве. Если площадь электродов S , расстояние между ними l , диэлектрическая проницаемость эмульсии ϵ , а её удельное сопротивление ρ , то величины C и R можно приближенно оценить по формулам [9]:

$$R = \rho \frac{l}{S}; \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{l}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}. \quad (2)$$

Также учтем сопротивление соединительных элементов, связывающих источник питания и электроды как $r_{\text{д}}$. Таким образом, схема замещения нагрузки будет выглядеть согласно рисунку 2.

Таким образом, возникает достаточно сложная техническая задача: необходимо в короткий промежуток времени ($\tau_{\phi} < 5 \cdot 10^{-4}$ с) резко изменить напряжение на конденсаторе от 0 до максимального значения. Определим, при выполнении каких условий это возможно.

Рисунок 2. Схема замещения электродегидратора

Figure 2. Electric dehydrator replacement circuit

Представим, что в соответствии с рисунком 1 в нужный момент времени на конденсатор подано $U = U_m$.

Проанализируем переходные процессы, возникающие в данной схеме замещения:

$$\begin{cases} u_C = i_R R, \\ i_C = C \frac{dU_c}{dt}, \\ u = u_C + i r_L, \\ i = i_C + i_R, \end{cases} \quad (3)$$

где u_C — мгновенное напряжение на конденсаторе в момент времени t , В;

i_R — мгновенный ток через сопротивление, А;

R — сопротивление, Ом;

i_C — мгновенный ток через конденсатор, А;

C — емкость конденсатора, Ф;

i — суммарный мгновенный ток нагрузки;

r_L — сопротивление соединительных элементов;

u — мгновенное напряжение на нагрузке, В.

Решив данную систему уравнений, найдем постоянную переходного процесса τ :

$$\tau = \frac{C R r_L}{R + r_L}. \quad (4)$$

Для того, чтобы напряжение менялось заданным образом, необходимо, чтобы выполнялось условие $5\tau \leq \tau_\phi$, так как считается, что за 5τ все переходные процессы завершаются практически полностью.

Создавать напряжение заданной формы, как на рисунке 1, можно, используя тиристоры. Если установить угол отпирания тиристоров равным 90° , то несложно добиться подобной эпюры напряжения с помощью следующей схемы (рисунок 3).

Рисунок 3. Схема преобразования формы напряжения

Figure 3. Voltage waveform conversion circuit

Подробнее опишем работу схемы. Пусть питающее напряжение изменяется по закону

$$U = U_m \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t),$$

где f — переменная частота, настраиваемая ранее в инвертирующем блоке;

U_m — амплитудное значение подаваемого напряжения.

Оба тиристора VS1 и VS2 открываются в момент времени $\phi = 90^\circ$, ϕ — фаза питающего напряжения.

В промежутке $(0-90)^\circ$ тиристор VS1 закрыт, диод VD1 закрыт, ток в цепи не течет, напряжение на нагрузке равно 0.

При $\varphi = 90^\circ$ на тиристор VS1 подается управляющий сигнал, он отпирается, также открыт диод VD2, по цепи течет ток, напряжение на нагрузке после переходного процесса, описанного ранее, становится равным подаваемому напряжению.

При $\varphi = 180^\circ$ тиристор VS1 запирается, тиристор VS2 закрыт.

В промежутке времени $(180-270)^\circ$ ток в цепи не течет.

При $\varphi = 270^\circ$ на тиристор VS2 подается управляющий сигнал, он отпирается, также открыт диод VD1, по цепи течет ток, напряжение на нагрузке после переходного процесса, описанного ранее, становится равным подаваемому напряжению.

Затем процесс циклически повторяется. Таким образом, полная принципиальная схема установки выглядит согласно рисунку 4.

Генератор питается от напряжения промышленной сети. На повышающем трансформаторе устанавливается необходимое в дальнейшем действующее значение напряжения. Затем устанавливается цепочка выпрямитель — фильтр — инвертор, благодаря которой появляется возможность менять промышленную частоту на необходимую для осуществления технологического процесса. В последнем блоке реализуется преобразование синусоидального напряжения к напряжению необходимой формы.

Существуют различные методы моделирования электромагнитных полей [10]. В данной работе построена модель электрической схемы устройства для преобразования формы входного напряжения (рисунок 5).

Рисунок 4. Функциональная схема работы генератора

Figure 4. Functional electrical circuit of the generator

Рисунок 5. Моделирование работы генератора в программе Matlab R2017b Simulink

Figure 5. Simulation of generator operation in the program Matlab R2017b Simulink

Основные технические параметры элементов следующие. Источник переменного напряжения: $U_m = 11800$ В; $f = 50$ Гц; $\varphi = 0$.

Параметры управляющего воздействия на тиристор VS1 представлены на рисунке 6.

Параметры управляющего воздействия на тиристор VS2 представлены на рисунке 7.

Параметры нагрузки рассчитаны по (2):

$$C = 0,088 \text{ пФ}; R = 20 \text{ МОм}.$$

Управляющие импульсы на тиристоры подаются в соответствии с принципом работы схемы, изложенным выше. На рисунках 8, 9 представлены осциллограммы управляющих импульсов, подаваемых на тиристоры VS1 и VS2.

В результате между электродами образуется электрическое поле нужной формы и амплитуды (рисунок 10).

Amplitude:

3

Period (secs):

0.02

Pulse Width (% of period):

5

Phase delay (secs):

0.0049

Рисунок 6. Управляющее воздействие на тиристор VS1

Figure 6. Thyristor control VS1

Amplitude:

3

Period (secs):

0.02

Pulse Width (% of period):

5

Phase delay (secs):

0.0149

Рисунок 7. Управляющее воздействие на тиристор VS2

Figure 7. Thyristor control VS2

Рисунок 8. Осциллограмма управляющих импульсов тиристора VS1

Figure 8. Oscillogram of thyristor control pulses VS1

Рисунок 9. Осциллограмма управляющих импульсов тиристора VS2

Figure 9. Oscillogram of thyristor control pulses VS2

Рисунок 10. Осциллограмма напряжения между электродами устройства

Figure 10. Oscillogram of the voltage between the electrodes of the device

Вывод

Проведенные теоретические исследования, а также моделирование в программе Matlab R2017b Simulink позволили выбрать нужную электрическую схему для преобразования формы напряжения к импульсной, необходимой для создания электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяных эмульсий, обладающего заданными параметрами. Данные исследования необходимы для создания лабораторной установки для проведения натурных экспериментов, разработки системы управления тиристорами. В дальнейшем планируется проведение экспериментов, направленных на изучение эффективности применения импульсного электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяных эмульсий.

Список источников

1. Мустафин Ф.М., Быков Л.И., Гумеров А.Г. и др. Промысловые трубопроводы и оборудование. М.: Изд-во Недр, 2004. 662 с.
2. Пат. 2429277 РФ, МПК С 10 G 32/02. Способ обезвоживания и обессоливания нефтей / Д.А. Каримов. 20.09.2011.
3. Иванов М.Д., Конесев С.Г. Генератор импульсного электромагнитного поля для обезвоживания водонефтяной эмульсии // Матер. 71-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных УГНТУ. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. 572 с.
4. Хазиева Р.Т., Иванов М.Д. Выбор оптимальных параметров устройства для генерации постоянного магнитного поля // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 6. С. 176-187. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-176-187.
5. Пат. 2167692 РФ, МПК В 01 D 17/06. Способ обезвоживания водонефтяной эмульсии / В.С. Генкин, Е.Я. Лапица, Г.З. Мирзабекян, Ю.В. Пушкин, А.В. Семенов, З.Т. Тенишвили. 27.05.2001.
6. Пат. DE1642867 Германия, МПК В 01 D 17/06. Verfahren zur elektrischen

Исследования выполнены на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022-2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна.

Приоритетное направление модернизации российской экономики (направление конкурса № СП-2022 Совета по грантам Президента Российской Федерации) «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива». Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

behandlung von dispersionen / Winslow Joseph D. Jun, Lucas Roy N., Wilson Homer M. Petrolite Corp., 31.05.1972.

7. Пат. GB2171031 (А) Великобритания, МПК В 01 D 17/06. Electrostatic Separation of Liquid Dispersions / Bailes Philip Jensen, Larkai Samuel Kojo Larley, Univ Bradford, 20.08.1986.

8. Пат. 6451174 США, МПК С 07 С 1/00; В 01 J 19/08. High Frequency Energy Application to Petroleum Feed Processing / S.M. Burkitbayev. 06.04.2006.

9. Логинов В.И. Обезвоживание и обессоливание нефтей. М.: Химия, 1979. 216 с.

10. Yuan Zh., Ma Q., Liang Z., Yu H. Simulation of Electromagnetic Field of Indirect Electrostatic Discharge Test by Using the FDTD Method // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China, 2011. С. 1-4. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748901.

References

1. Mustafin F.M., Bykov L.I., Gumerov A.G. e.a. *Promyslovye truboprovody i oborudovanie* [Field Pipelines and Equipment]. Moscow, Nedra Publ., 2004. 662 p. [in Russian].

2. Karimov D.A. *Sposob obezvozhivaniya i obessolivaniya neftei* [Method of Oil Dehydration and Desalination]. Patent RF No. 2429277, 2011. [in Russian].
3. Ivanov M.D., Konesev S.G. Generator impul'snogo elektromagnitnogo polya dlya obezvozhivaniya vodonefityanoi emul'sii [Generator of a Pulsed Electromagnetic Field for Dehydration of Water-Oil Emulsion]. *Materialy 71-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh UGNTU* [Materials of the 71st Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists of USPTU]. Ufa, UGNTU Publ., 2020. 572 p. [in Russian].
4. Khazieva R.T., Ivanov M.D. Vybor optimal'nykh parametrov ustroystva dlya generatsii postoyannogo magnitnogo polya [Choice of the Optimal Parameters of the Device for Generating a Constant Magnetic Field]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, 2020, Vol. 22, No. 6, pp. 176-187. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-176-187. [in Russian].
5. Genkin V.S., Lapiga E.Ya., Mirzabekyan G.Z., Pushnin Yu.V., Semenov A.V., Tenieshvili Z.T. *Sposob obezvozhivaniya vodonefityanoi emul'sii* [Method of Dehydration of Water-Oil Emulsion]. Patent RF No. 2167692, 2001. [in Russian].
6. Winslow Joseph D. Jun, Lucas Roy N., Wilson Homer M. *Verfahren zur elektrischen behandlung von dispersionen*. Patent Germany No. DE1642867, 1972.
7. Bailes Philip Jensen, Larkai Samuel Kojo Larley, Univ Bradford. *Electrostatic Separation of Liquid Dispersions*. Patent GB No. GB2171031 (A), 1986.
8. Burkitbayev S.M. *High Frequency Energy Application to Petroleum Feed Processing*. Patent USA No. 6451174, 2006.
9. Loginov V.I. *Obezvozhivanie i obessolivanie neftei* [Dehydration and Desalting of Oils]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 216 p. [in Russian].
10. Yuan Zh., Ma Q., Liang Z., Yu H. Simulation of Electromagnetic Field of Indirect Electrostatic Discharge Test by Using the FDTD Method. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Wuhan, China, 2011, pp. 1-4. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5748901.