

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМА РАБОТЫ ЛАБОРАТОРНОЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

Александр Анатольевич Белов

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

Основными отличительными особенностями разработанной лабораторной электрогидравлической установки для обеззараживания воды в сравнении с известными являются параметры узлов конструкции и режим её работы. Для штатной работы установки требуется подобрать обоснованные расчётным методом параметры импульсного трансформатора и искрового разрядника. Лабораторная установка состоит из генератора импульсных напряжений, искрового разрядника, рабочего органа и контрольно-измерительной аппаратуры. Генератор импульсных напряжений предназначен для выработки напряжения, величины которого достаточно для пробоя формирующего и рабочего промежутков между электродами, за счёт чего некоторая часть энергии выделяется в канале искрового разрядника. Условиями номинального режима работы установки являются: минимальное потребление энергии формирующего и рабочего промежутков от накопительного устройства, надёжность работы и долговечность составных деталей и узлов. В соответствии с разработанной структурной схемой генератор импульсных напряжений состоит из источника питания, импульсного высоковольтного повышающего трансформатора (умножителя энергии) с выпрямителем высокого напряжения, собранным по двухполупериодной схеме, и ёмкостного накопительного устройства с сосредоточенными параметрами (конденсатора). Обоснованы такие параметры трансформатора, как число витков, средний диаметр, токи и напряжения первичной и вторичной обмоток, а также такие параметры искрового разрядника, как удельное и полное действие к моменту времени импульсного тока, переносимый этим током заряд и материал электродов. Номинальный режим работы установки для обеззараживания воды: мощность трансформатора – 1 кВт; рабочее напряжение – 10 кВ; ёмкость конденсатора – 1 мкФ; формирующий и рабочий промежутки – 1–2 мм; система электродов – острие-диск; частота искровых электрических разрядов – 3 Гц; количество разрядов – 100–500 шт.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокое напряжение, импульсный ток, искровой разрядник, повышающий трансформатор, электрогидравлический эффект.

SUBSTANTIATION OF PARAMETERS AND OPERATING MODE OF ELECTROHYDRAULIC LABORATORY SET FOR WATER DECONTAMINATION

Alexander A. Belov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM

The main distinctive features of the developed electrohydraulic laboratory setup for water disinfection in comparison with the known ones are the parameters of the design components and the operating mode of the facility. For normal operation of the setup, it is necessary to select the parameters of the pulse transformer and spark arrester that are substantiated by the calculation method. The laboratory setup consists of pulse voltage generator, spark arrester, working body and control & measuring equipment. The pulse voltage generator is designed to generate such a voltage which is sufficient to break down the forming and working gaps between the electrodes, due to which some of the energy is released in the spark arrester channel. The conditions of the nominal operating mode of the setup are as follows: minimum energy consumption of the forming and working intervals from the storage device, reliability of operation and durability of composite parts and assemblies. In accordance with the developed structural scheme, the pulse voltage generator consists of a power source, pulsing high-voltage boost transformer (energy multiplier) with a high-voltage rectifier assembled according to a full-wave circuit, and a capacitive storage device with lumped-constant circuit parameters (capacitor). The parameters of the transformer, such as the number of turns, the average diameter, the currents and voltages of the primary and secondary windings, as well as the parameters of the spark arrester, such as specific current action and full effect at the time of the pulse current, the charge carried by this current and the material of the electrodes, are justified. Nominal operating mode of the water disinfection unit is as follows: transformer power is 1 kW; operating voltage is 10 kV; capacitance is 1 μ F; forming and working intervals are 1–2 mm; electrode system is pointed end-disk; frequency of spark electric discharges is 3 Hz; the number of digits is 100–500 pcs.

KEYWORDS: high voltage, pulse current, spark arrester, boost transformer, electrohydraulic effect.

Введение
Электрогидравлический эффект является следствием генерации высоковольтных искровых импульсных разрядов в водной среде. Положительные свойства электрогидравлического эффекта используются в промышленности и сельском хозяйстве для выполнения разнообразных операций, работ и технологий [5]. Однако широкое применение этого метода электрофизического воздействия на воду сдерживается требованиями техники безопасности, которые необходимо соблюдать при работе с высоковольтными установками [9]. Рабочий диапазон электрических напряжений может находиться в пределах до 70 кВ [3, 6]. Рабочие электроды установки, работающей при таких номиналах напряжения, должны иметь надёжную изоляцию достаточной толщины и прочности от корпуса, контрольно-измерительной аппаратуры и других узлов оборудования [2]. Для обеззараживания воды рабочего напряжения искровых разрядов в 10 кВ может быть достаточно для достижения показателей по норме очистки [10]. В этой связи следует обосновать параметры лабораторной установки.

Основными отличительными особенностями изготовленной лабораторной электрогидравлической установки для обеззараживания воды в сравнении с известными и ранее исследованными образцами аналогичных технических средств являются параметры узлов конструкции и режим работы установки [4]. Для штатной работы установки требуется подобрать обоснованные расчётным методом параметры импульсного трансформатора и искрового разрядника установки.

Материалы и методы

Используемое оборудование:

- блок питания FA-S-1/300W;
- трансформатор TDKS 32-04;
- выпрямитель напряжения;
- ограничительное сопротивление 1 кОм;
- конденсатор K75-29A (16 кВ, 1 мкФ);
- кавитационная рабочая ёмкость из 3D-пластика (материал ABS);
- контрольно-измерительная аппаратура.

Для определения параметров трансформатора применяется метод расчёта на основании анализа эквивалентных схем замещения.

Результаты и их обсуждение

Лабораторная электрогидравлическая установка для обеззараживания воды состоит из генератора импульсных напряжений, искрового разрядника, рабочего органа и контрольно-измерительной аппаратуры.

Рабочий орган выполняет функции кавитационной ёмкости, в которой осуществляется набор обрабатываемой воды и формируются разряды.

Генератор импульсных напряжений предназначен для выработки напряжения, величины которого достаточно для пробоя формирующего и рабочего промежутков между электродами. Таким образом, некоторая часть энергии выделяется в канале искрового разрядника.

Условиями номинального режима работы установки являются:

- минимальное потребление энергии формирующего и рабочего промежутков от накопительного устройства;
- надёжность работы;
- долговечность составных деталей и узлов.

В соответствии со структурной схемой генератор импульсных напряжений состоит из источника питания, импульсного высоковольтного повышающего трансформатора (умножителя энергии) с выпрямителем высокого напряжения, собранным по двухполупериодной схеме, и ёмкостного накопительного устройства с сосредоточенными параметрами (конденсатора).

Структурная схема лабораторной электрогидравлической установки для обеззараживания воды представлена на рисунке 1.

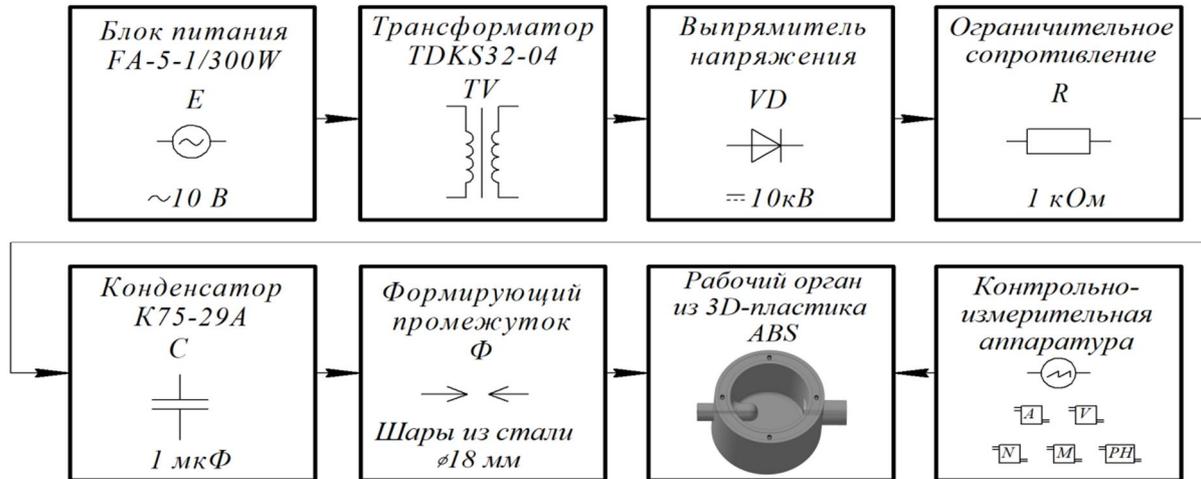


Рис. 1. Структурная схема лабораторной электрогидравлической установки для обеззараживания воды

Импульсный высоковольтный повышающий трансформатор предназначен для увеличения максимального значения прямоугольного импульса напряжения, который генерируется от источника с сосредоточенной ёмкостью. Исходными при расчётах являются параметры источника напряжения, включённого в первичную цепь трансформатора, нагрузки, а также максимальное значение и форма выходного импульса напряжения. Определяются параметры схемы замещения трансформатора [1].

При расчётах чаще всего применяется одна из схем замещения, приведённых на рисунке 2.

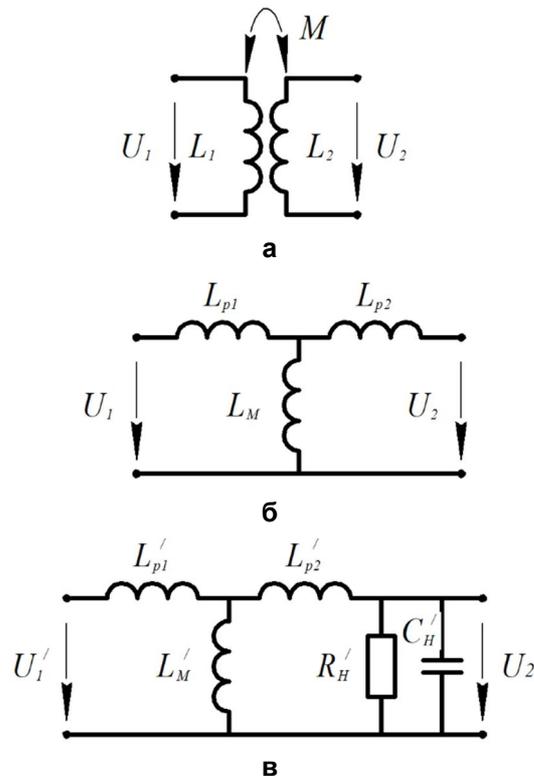


Рис. 2. Схемы замещения импульсного трансформатора

В них входят индуктивности первичной и вторичной обмоток L_1 и L_2 , взаимная индуктивность M (рис. 2, а) или же индуктивности рассеяния обмоток L_{p1} и L_{p2} и индуктивность намагничивания L_M . Более удобной зачастую оказывается схема с приведением элементов к первичной или ко вторичной стороне трансформатора. В качестве примера на рисунке 2, в представлена схема с приведением к первичной стороне. В ней кроме трансформатора учтены ёмкость нагрузки C_H и сопротивление нагрузки R_H .

При приведении к первичной стороне:

$$U'_1 = U_1; L'_{p1} = L_{p1}; L'_M = L_M; L'_{p2} = \frac{L_{p2}}{K^2}; R'_H = \frac{R_H}{K^2}; U'_2 = \frac{U_2}{K}; C'_H = C_H \cdot K^2, \quad (1)$$

где K – отношение числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки.

При приведении к вторичной стороне:

$$U''_1 = U_1 \cdot K; L''_{p1} = L_{p1} \cdot K^2; L''_M = L_M \cdot K^2; L''_{p2} = L_{p2}; R''_H = R_H; U''_2 = U_2; C''_H = C_H. \quad (2)$$

Параметры схем на рисунках 2, а и 2, б связаны между собой следующими соотношениями:

$$L_{p1} + L'_{p2} = L_1 - \frac{M}{K}; L'_M + L_{p1} = L_1; L''_{p1} + L_{p2} = L_2 - M \cdot K; L''_M + L_{p2} = L_2. \quad (3)$$

Суммарная индуктивность рассеяния определяется магнитным потоком, заключённым между первичной и вторичной обмотками. Для её расчёта находятся напряжённости магнитного поля между обмотками

$$H_{1,2} = \frac{i_1 \cdot n_1}{h} \quad (4)$$

и в первичной, и вторичной обмотках:

$$H_1 = \frac{i_1 \cdot n_1 \cdot r}{\delta_1 \cdot h}; H_2 = \frac{i_2 \cdot n_2 \cdot (1 - \frac{r}{\delta_2})}{h}, \quad (5)$$

где i_1 и i_2 – токи первичной и вторичной обмоток;

n_1 и n_2 – числа витков;

δ_1 и δ_2 – толщины обмоток;

h – ширина обмоток;

r – радиус провода, которым образован контур.

Энергия магнитного поля, заключённого между первым слоем первичной обмотки и последним слоем вторичной, равна

$$W = \frac{\pi \cdot h \cdot D_{cp} \cdot \mu_0}{2} \int_0^\delta H^2 dr, \quad (6)$$

где D_{cp} – средний диаметр обмоток трансформатора;

μ_0 – магнитная постоянная;

$\delta = \delta_1 + \delta_{1,2} + \delta_2$.

Таким образом, определяются следующие параметры используемого в установке импульсного повышающего трансформатора: число витков, средний диаметр, токи и напряжения первичной и вторичной обмоток.

Параметры искрового разрядника обосновываются величинами импульсных токов и пробивных напряжений [1]. При искровых разрядах в формирующем и рабочем промежутках протекает сложный по форме импульсный ток, состоящий из одного или нескольких всплесков величиной около $10^4 - 10^5$ А и длительностью по времени 10^{-4} с, наложенных на длительный ток (десятые доли секунды) до 10^3 А.

В основе протекания импульсных токов лежат два физических явления: выделение энергии в виде тепла в проводниках при протекании по ним тока и создание магнитного поля в пространстве, окружающем проводник, и в самом проводнике. В импульсных режимах реализуются огромные скорости выделения энергии и плотности энергии, не достигаемые в стационарных режимах.

Протекание импульсного тока в среде с определённой электропроводностью вызывает нагрев среды, часто близкий к адиабатическому. При нагреве меняются механические свойства среды, её теплофизические параметры, происходят фазовые переходы. Так, твёрдый проводник может разрушиться, расплавиться и испариться.

В импульсном режиме этот процесс сопровождается возникновением мощного светового излучения, ударной волны и электрической дуги. Комплекс явлений, сопровождающий протекание импульсного тока большой плотности по проводнику, можно считать электрическим взрывом проводника.

Обобщённым параметром, описывающим выделение энергии при протекании импульсного тока, является удельное действие

$$A = \int_0^t j^2 dt, \quad (7)$$

где j – плотность тока.

Для каждого металла при определённых значениях A и пренебрежимо малых тепловых потерях происходят фазовые переходы. Значением удельного действия определяется температура проводника после протекания по нему тока.

Протекание тока сопровождается импульсной дугой, горящей между металлическими электродами. В местах контакта металла и дуги наблюдается эрозия – испарение, плавление и разбрызгивание металла. Процессы эрозии определяются скоростью ввода энергии в электрод. Причиной эрозии является поверхностный источник тепла, поступающий из приэлектродной зоны дуги. Поскольку приэлектродное падение напряжения слабо зависит от тока, энергия, поступающая в электрод, пропорциональна заряду Q , переносимому током I

$$Q = \int_0^t I dt. \quad (8)$$

Таким образом, степень эрозии увязывается с величиной заряда.

Электродинамические силы при больших токах вызывают перемещение, деформацию и разрушение проводников с током. Давление, определяемое произведением плотности тока на напряжённость магнитного поля, пропорционально значению j^2 , а импульс силы и работа, совершаемая при перемещении проводника, – значению A . Плотность энергии магнитного поля в системе с проводниками во многих случаях может быть принята пропорциональной значению A . В импульсных режимах достигаются большие плотности тока, значения электродинамических сил могут превышать предел прочности материала проводника, и проводник деформируется и разрушается. В этой связи важными параметрами импульсного тока помимо текущего значения являются Q , A и полное действие к моменту t

$$A_{\Pi} = \int_0^t I^2 dt. \quad (9)$$

Эти величины определяют параметры искрового разрядника электрогидравлической установки.

Любой источник или генератор импульсного тока представляет собой, как правило, накопитель энергии. Лишь сравнительно небольшие импульсные токи можно получить непосредственно от сети, не вызывая опасных для сети режимов, близких к коротким замыканиям. В накопителе в течение времени, превышающего длительность импульса тока, происходит накопление энергии в той или иной форме при относительно небольшой мощности, потребляемой от источника питания. При разряде накопителя за короткое время развиваются высокие мощности, необходимые для генерирования импульсного тока и пропускания его через нагрузку.

Таким образом, обосновывается выбор ёмкостного накопителя, используемого в качестве источника импульсного тока.

В ёмкостном накопителе энергия накапливается в виде энергии электростатического поля в конденсаторах. Процесс накопления происходит при зарядке конденсато-

ров от маломощного выпрямителя высокого напряжения, а разряд вызывается подключением нагрузки через коммутирующие устройства. Такими устройствами выступают разрядники. Большинство ёмкостных накопителей может быть сведено к простейшей схеме разрядной цепи, состоящей из последовательно соединённых заряженной до напряжения ёмкости, индуктивности и активного сопротивления [7]. В индуктивность входят внутренняя индуктивность накопителя, индуктивности нагрузки и соединительных шин [8]. То же относится и к сопротивлению.

Стабильность характеристик разрядника при многократной работе определяется в первую очередь материалом и формой электродов, однако немалую роль в этом вопросе играет и рабочая среда. В изготовленной установке рабочей средой является жидкость. К материалам электродов разрядников предъявляются требования малой электрической эрозии, сохранения ровного рельефа поверхности после разрядов. Это необходимо для поддержания стабильным статического пробивного напряжения разрядника. Удовлетворение отмеченных требований приводит к использованию разрядников с распределённой зоной разряда по небольшой поверхности электродов. При больших токах и длительности разряд контрагирован, и электроды подвергаются интенсивному тепловому воздействию в опорных точках канала разряда. При этом важен правильный выбор материала электродов. При больших длительностях разряда предпочтительно отдаётся материалам, содержащим легколетучие компоненты. Несмотря на повышенный износ таких материалов интенсивное испарение приводит к более ровной поверхности электродов.

В водяных разрядниках имеется большой разброс пробивных напряжений. Это является следствием влияния загрязнения среды продуктами эрозии и неровностью электродов. Почти весь расплавленный металл удаляется с электродов мощными гидродинамическими потоками, возникающими при импульсном разряде в воде. В разряднике с жидкой рабочей средой возникают сильные механические нагрузки, действующие на изоляцию и электроды.

Номинальный режим работы установки для обеззараживания воды имеет следующие характеристики:

- мощность трансформатора – 1 кВт;
- рабочее напряжение – 10 кВ;
- ёмкость конденсатора – 1 мкФ;
- формирующий и рабочий промежутки – 1–2 мм;
- система электродов – острие-диск;
- частота искровых электрических разрядов – 3 Гц;
- количество разрядов – 100–500 шт.

Выводы

Установлено, что основными отличительными особенностями изготовленной лабораторной электрогидравлической установки для обеззараживания воды в сравнении с известными и ранее исследованными прототипами образцов технических средств являются параметры узлов конструкции и режим работы установки.

Условиями номинального режима работы установки являются минимальное потребление энергии формирующего и рабочего промежутков от накопительного устройства, надёжность работы и долговечность составных деталей и узлов.

В соответствии с разработанной структурной схемой генератор импульсных напряжений состоит из источника питания, импульсного высоковольтного повышающего трансформатора (умножителя энергии) с выпрямителем высокого напряжения, собранным по двухполупериодной схеме, и ёмкостного накопительного устройства с сосредоточенными параметрами (конденсатора).

Обоснованы такие параметры используемого в установке импульсного повышающего трансформатора, как число витков, средний диаметр, токи и напряжения первичной и вторичной обмоток, а также такие параметры искрового разрядника, как удельное и полное действие к моменту времени импульсного тока, переносимый этим током заряд и материал электродов.

Библиографический список

1. Авруцкий В.А. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента : учеб. пособие / В.А. Авруцкий, И.П. Кужекин, Е.Н. Чернов ; под ред. И.П. Кужекина. – Москва : МЭИ, 1983. – 262 с.
2. Белов А.А. Конструктивные особенности СВЧ-оборудования для термообработки фуражного зерна / А.А. Белов, В.Ф. Сторчевой, О.В. Михайлова // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 4. – С. 115–121.
3. Модульная установка для обработки зерна / А.Н. Васильев, Д.А. Будников, А.А. Васильев и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. – № 5. – С. 27–30.
4. Сторчевой В.Ф. Создание озонно-ионной воздушной среды в закрытых помещениях для содержания животных и птицы / В.Ф. Сторчевой, С.В. Сучугов, А.Е. Компаниец // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2019. – № 3 (91). – С. 35–39.
5. Belov A.A. Electrical conductivity of water treated by spark discharge / A.A. Belov, A.N. Vasilyev, A.A. Musenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics. – 2019. – Vol. 7, No. 3. – Pp. 422–431.
6. Degradation of high-concentration simulated organic wastewater by DBD plasma / X. Li, R.-W. Zhou, J. Huang, W. Chen, F.-P. Wang, X.-Y. Lu, Q. Wen // Water Science and Technology. – 2019. – Vol. 80 (8). – Pp. 1413–1420.
7. Innovations in technologies of agricultural raw materials processing / M.V. Belova, G.V. Novikova, O.V. Mikhailova, I.G. Ershova, M.A. Ershov // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, No. 6. – Pp. 1269–1277.
8. Optimization of microclimate parameters inside livestock buildings / G.N. Samarin, A.N. Vasilyev, A.A. Zhukov, S.V. Soloviev // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 866. – Pp. 337–345.
9. Yudaev I.V. Analysis of variation in circuit parameters for substitution of weed plant tissue under electric impulse action / I.V. Yudaev // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2019. – Vol. 55 (2). – Pp. 219–224.
10. Zheng J.S. Inactivation of *Staphylococcus aureus* in water by pulsed spark discharge / J.S. Zheng // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7 (1). – 10311.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Принадлежность к организации

Александр Анатольевич Белов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электрофизического воздействия на сельскохозяйственные объекты и материалы ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Россия, г. Москва, e-mail: belalexan85@gmail.com.

Дата поступления в редакцию 18.09.2020

Дата принятия к печати 28.10.2020

AUTHOR CREDENTIALS

Affiliations

Alexander A. Belov, Doctor of Engineering Sciences, Leading Research Scientist, Laboratory of Electrophysical Impact on Agricultural Objects and Materials, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Russia, Moscow, e-mail: belalexan85@gmail.com.

Received September 18, 2020

Accepted after revision October 28, 2020