

Особенности проектирования высоковольтных импульсных технологических установок по обработке водосодержащих сред в проточном режиме

ГУРБАНОВ Э.Д.

Рассмотрена разработка конструкций разрядных камер для исследуемых объектов в высоковольтных импульсных установках технологического назначения по электронной обработке водосодержащих сред и методов безопасной эксплуатации высоковольтного оборудования для защиты обслуживающего рабочего персонала от высокочастотных электромагнитных импульсных помех. Показано, что при конструировании рабочих камер для обработки водосодержащей среды в проточном режиме должны быть выполнены условия по недопущению объемного и поверхностного пробоя камеры и требования по экранированию высоковольтной установки по всему периметру для обеспечения безопасной работы персонала.

Ключевые слова: высоковольтная установка, рабочая камера, импульсный разряд, водосодержащая среда, нагрузка

Высоковольтные импульсные установки технологического назначения разрабатываются для очистки воздуха от вредных, токсичных примесей, обеззараживанию питьевой и сточных вод от патогенных, болезнетворных микроорганизмов, для разрушения хрупких материалов и т.д. [1–3]. В основе всех этих устройств находится высоковольтное оборудование (трансформатор переменного напряжения, высоковольтный выпрямитель, генератор импульсных напряжений и нагрузка либо тиристорный генератор, импульсный трансформатор и нагрузка). Нагрузкой генератора в данных установках служит разрядная камера специальной конструкции, внутри которой находится исследуемый объект. В обоих случаях на нагрузку подаются высоковольтные импульсы определенной частоты следования с коротким фронтом и максимальной амплитудой за счет использования на выходе генератора многозазорных искровых разрядников (обострителей). Это снимает проблему минимизации длительности фронта импульса на высоковольтном выходе импульсного трансформатора, которая, как правило, решается путем уменьшения числа витков как в первичной, так и во вторичной обмотках, а также за счет уменьшения коэффициента трансформации. Тщательное согласование всех узлов установок данного технологического назначения имеет принципиальное значение как с точки зрения эффективности процесса обработки водосодержащей среды, так и безопасности эксплуатации (недопущения электрического пробоя во внутреннем объеме и по поверхности рабочей камеры, воздей-

ствия электромагнитных помех на рабочий персонал).

Разрядные камеры для исследуемого объекта в высоковольтных импульсных установках могут выполняться как стационарными, так и проточными, в зависимости от поставленной задачи.

В статье рассматриваются особенности разработки конструкций проточных камер для обработки водосодержащих сред с импедансом 10–100 Ом. В рабочий объем таких камер через вводные и выводные отверстия (в изоляционном корпусе или электродах) обрабатываемая жидкость поступает и отводится в процессе обработки непрерывно. Эти отверстия снаружи заканчиваются изоляционными или металлическими штуцерами для подключения разрядной камеры с помощью трубопроводов (шлангов) к системе перекачки обрабатываемой жидкости. Проточному режиму обработки присущи следующие преимущества:

- высокая скорость обработки;
- возможность автоматизировать процессы перекачки обрабатываемой жидкости;
- возможность непрерывного контроля качества обработки;
- значительное снижение вероятности вторичного микробиологического заражения обрабатываемой жидкости.

Это дает возможность достаточно просто встраивать установку для импульсной обработки в проточном режиме в уже существующие технологические линии, например в пищевой промышленности. При обработке в проточном режиме упрощена система контроля температуры обрабатываемой

мой жидкости, выводимой из разрядной камеры после обработки. По значению этой температуры можно контролировать интенсивность обработки.

В качестве возможных конфигураций электродов разрядной камеры можно рассматривать параллельные противостоящие плоские электроды со скругленными краями, концентрические цилиндры, стержень–стержень, биконус и др. Наиболее удобными являются плоскопараллельные электроды, позволяющие создавать в рабочей зоне разрядной камеры близкое к однородному, сильное импульсное электрическое поле. При этом коэффициент неоднородности $k_H \leq 1,5$. Существует ряд конструкций разрядной камеры с плоскопараллельными электродами [4].

Недостатком цилиндрических коаксиальных разрядных камер (с электродами в виде концентрических цилиндров) является трудно устранимое неравномерное распределение тока по камере за счет существенного перепада температуры в разрядной камере, возникающего по мере обработки продукта. Обработываемый нагретый жидкий продукт стремится подняться вверх. С повышением температуры уменьшается удельное объемное сопротивление продукта и через него протекает больший ток, т.е. продукт продолжает усиленно нагреваться, пропуская через себя все больший ток. Это снижает качество обработки, возникает повышенная вероятность образования газовых пузырьков и пробоа.

В разрядной камере с плоскими электродами (без застойных зон), рабочие поверхности которых горизонтальны, данный недостаток отсутствует, несмотря на нагрев обрабатываемой жидкости. В [5] представлена разрядная камера, где напряженность поля у рабочей поверхности металлических электродов уменьшена. Роль же практически эквипотенциальных электродов, контактирующих непосредственно с обрабатываемым продуктом, выполняют соответствующие порции самой обрабатываемой жидкости, находящейся в контакте с металлическими электродами. По мере протекания обрабатываемой жидкости обрабатываемый продукт сначала играет роль одного жидкостного электрода, затем, попадая в объем обработки, обрабатывается и, далее, играет роль другого жидкостного электрода. Основное напряжение прикладывается к продукту в объеме обработки, поскольку здесь поперечное сечение существенно меньше, чем в остальной части разрядной камеры, а сопротивление, соответственно, больше.

Недостатком такой конструкции разрядной камеры является то, что в объеме обработки рост рабочей напряженности поля ограничен электрической прочностью поверхности раздела обрабаты-

ваемой жидкости с изолятором камеры, а не самой обрабатываемой жидкости насквозь. Кроме того, камера имеет недостаточную производительность по сравнению с вариантами разрядных камер, в которых поперечное сечение рабочего объема соответствует поперечному сечению металлических электродов.

Представленная на рис. 1 разрядная камера лишена недостатков, присущих другим камерам. Поиск путей повышения производительности разрядных камер, увеличения электрической прочности по напряжению вдоль внутренней поверхности разрядной камеры при необязательности требования малого поперечного сечения объема обработки по сравнению с поперечным сечением металлических электродов в камере позволил разработать данную конструкцию. Камера содержит нижний и верхний электроды с центральным осевым отверстием соответственно для ввода и вывода обрабатываемой жидкости. Электроды имеют дискообразную форму. Промежуток между электродами заполнен движущейся ламинарно обрабатываемой жидкостью и является объемом обработки, в котором создается сильное импульсное электрическое поле. Внутренний объем камеры, помимо рабочих поверхностей электродов, ограничен внутренней вогнутой поверхностью диэлектрического корпуса. Последний выполнен из фторопласта и представляет собой диск толщиной 20 мм, диаметром 170 мм с центральным отверстием под электроды. Расстояние по внутренней поверхности корпуса между электродами составляет 22 мм, а между рабочими поверхностями электродов – 8–10 мм. Для увеличения электрической прочности наружная поверхность корпуса развита цилиндрическими кольцевыми проточками (канавками) глубиной 5 и шириной 5 мм на боковой поверхности и шириной 10 мм на нижней и верхней поверхностях.

Диаметр центрального входного отверстия в нижнем электроде 6,5 мм, а диаметр рабочей части электрода, находящейся во внутренней полости разрядной камеры, 38 мм. Электроды прижимают-

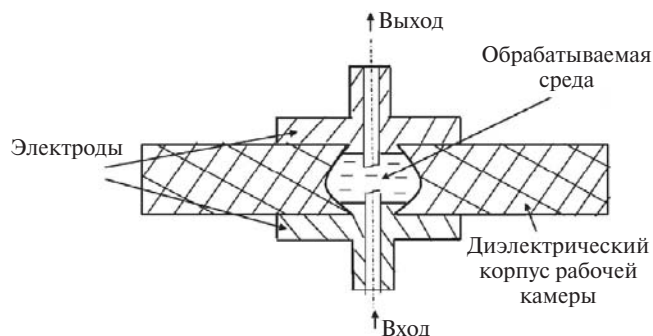


Рис. 1. Конструкция технологической разрядной камеры

ся к диэлектрическому корпусу с помощью диэлектрических балок и шпилек; отдельного уплотнения не требуется. В такой разрядной камере поле близко к однородному, а поток обрабатываемой жидкости близок к ламинарному, при этом жидкость обрабатывается равномерно, без застойных зон.

Данная разрядная камера прошла ресурсные испытания при напряженности ~ 10 МВ/м и напряжении ~ 100 кВ. В этих условиях получить необратимый пробой вдоль внутренней поверхности корпуса, полностью выводящий камеру из строя, не удалось. Можно допустить, что для импульсов длительностью < 1 мкс (а именно такие использовались в экспериментах) наиболее рационально использовать напряженность поля с амплитудой $\sim 9\text{--}10$ МВ/м при длительности импульсов от 0,2 до 1 мкс в зависимости от электрической прочности обрабатываемой жидкости или другого продукта, который содержит тот или иной процент (> 10) воды. Такая разрядная камера может быть рекомендована в качестве технологической.

При исследованиях потребовалось плавно изменять напряженность обрабатывающего электрического поля при неизменном выходном напряжении генератора импульсов (до 120 кВ). Этого можно добиться изменением межэлектродного расстояния в разрядной камере. Вместо использования предназначенных для этого диэлектрических кольцевых прокладок (они не очень удобны) и изготовления набора различных по высоте диэлектрических корпусов используется конструкция разрядной камеры с плавно меняющимся межэлектродным расстоянием.

В технологических высоковольтных импульсных установках рабочая камера может быть исполнена также с несколькими рабочими зонами (рис. 2).

Корпус камеры выполнен из изоляционного материала (фторопласта, полиэтилена) и состоит, к примеру, из двух свинчивающихся половин — электродов (нижний, промежуточный и верхний). Нижний и верхний электроды ввинчены в диэлек-

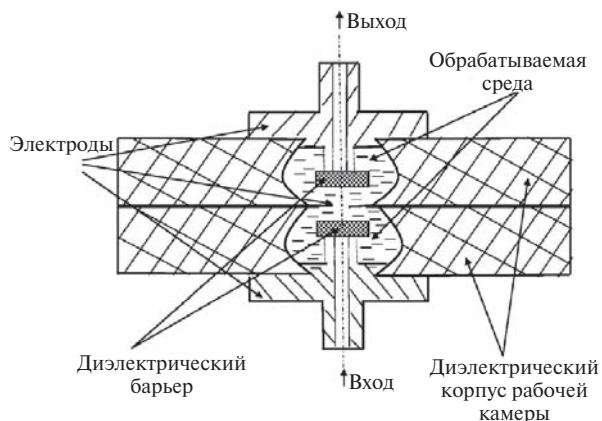


Рис. 2. Рабочая камера с несколькими рабочими зонами

трический корпус рабочей камеры, а промежуточный зажат между ними. Этот электрод может иметь, например, одно сквозное отверстие в центральной части. Внутренняя поверхность диэлектрического корпуса камеры выполнена так, что обеспечивает электрическую прочность вдоль поверхности соприкосновения с обрабатываемой жидкостью, большую, чем электрическая прочность (по напряжению) обрабатываемой жидкости насквозь. Наружная поверхность корпуса камеры развита с таким расчетом, чтобы исключить возможность электрического пробоя при приложении максимального используемого напряжения.

К промежуточному электроду возможно подключение высоковольтного (потенциального) электрода генератора импульсов высокого напряжения, а к нижнему и верхнему — низковольтного (заземленного) вывода генератора. В этом случае обеспечивается наибольшая электробезопасность разрядной камеры, поскольку устранен вынос высокого напряжения по подводящим и отводящим трубопроводам с обрабатываемой жидкостью. Половины корпуса соединяются через уплотняющие прокладки. Промежуточный электрод может быть выполнен как с одним, так и с несколькими отверстиями в центральной части. Чтобы не было искажения электрического поля, диаметр каждого из этих отверстий должен быть минимально допустимым, исходя из вязкости обрабатываемого жидкого или текучего продукта, требования ламинарного режима движения обрабатываемой жидкости в разрядной камере, требуемой производительности и близости значений давления в различных рабочих зонах.

При мегавольтных уровнях рабочих напряжений, необходимых для получения большей производительности камеры (≈ 10 м³/ч) и для более однородного распределения электрического поля в рабочем объеме, промежуточных электродов может быть любое нечетное число начиная с единицы. При этом они имеют два варианта исполнения: с отверстиями в центральной части и по периферии. В разрядной камере электроды чередуются, причем ближайшими к нижнему и верхнему электродам будут промежуточные электроды с отверстиями в центральной части. При использовании трех, пяти и более промежуточных электродов облегчаются условия работы разрядной камеры (более равномерно распределяется напряжение по частям внутренней поверхности корпуса), улучшается (становится более однородным) распределение поля в ней. Это позволяет при действии импульсов напряжения с амплитудами мегавольтного диапазона формировать в разрядной камере поля с напряженностью 10 МВ/м и более при промежутках между соседними электродами около 1–2 см. При ис-

пользовании нескольких промежуточных электродов для получения наиболее однородного поля потенциальный вывод генератора импульсов подключается к среднему промежуточному электроду. Однако он может быть подключен к верхнему (или нижнему) электроду. В этом случае к противоположному электроду подключается заземленный вывод.

При обработке импульсами электрического поля обрабатываемой жидкости, которая протекает между противостоящими друг другу поверхностями электродов, возможно выделение пузырьков газов за счет частичного ее нагрева. Однако в данной конструкции разрядной камеры отсутствуют условия для слияния пузырьков и налипания их на электроды и внутреннюю поверхность корпуса: нет застойных зон, завихрений, внутренняя поверхность обеих половин корпуса вынесена из зоны наиболее сильного электрического поля, в которой существует опасность развития нежелательных электрических разрядов. В этом случае пузырьки не являются центрами инициирования электрических пробоев между электродами в камере и на ее внутренней изоляционной поверхности, что позволяет значительно увеличить напряженность импульсного электрического поля, а следовательно повысить эффективность обработки и производительность. При напряженности 10 МВ/м и больше импульсных электрических полей с фронтами ≈ 20 нс появляется ряд новых механизмов инактивирующего действия на микроорганизмы и на структуру обрабатываемой жидкости в целом. Реально достигнутая напряженность в описываемой разрядной камере при экспериментальных исследованиях составила 12,5 МВ/м и ограничивалась сквозной электрической прочностью обрабатываемой жидкости.

Нагрев в разрядной камере при технологическом режиме не должен превышать 12 °С. При этом удельное объемное сопротивление обрабатываемой жидкости не слишком изменяется. При одинаковых межэлектродных зазорах в зонах обработки рассматриваемой разрядной камеры активное сопротивление обрабатываемой жидкости и падение напряжения на ней тем меньше, чем выше в зоне температура обрабатываемой жидкости. При этом следует учитывать, что с ростом температуры возрастает вероятность пробоя по пузырьковому механизму, что компенсируется уменьшением падения напряжения на обрабатываемой жидкости в зоне повышенной температуры.

Качество импульсной обработки в большой степени зависит от длительности фронта используемых импульсов: чем короче фронт импульса, тем сильнее инактивирующий эффект [6], так как при

$t_{\text{фр}} < 20$ нс внешнее электрическое поле проникает внутрь клетки (и тем интенсивнее, чем короче фронт). При получении коротких фронтов требуется минимизировать индуктивность выходного разрядного контура разрядной камеры. В связи с этим целесообразно, например, выполнить крайние (нижний и/или верхний) электроды разрядной камеры таким образом, чтобы одна часть каждого из них размещалась в разрядной камере и участвовала в процессе импульсной обработки, а оставшаяся часть являлась бы электродом выходного разрядника. В боковой цилиндрической поверхности крайних электродов разрядной камеры целесообразно выполнить и отверстия для ввода и вывода обрабатываемой жидкости. Все это позволяет существенно уменьшить индуктивность разрядного контура. Разрядный контур импульсной установки содержит обостряющий емкостный накопитель, многозазорный искровой разрядник и разрядную камеру.

Емкостный накопитель выполнен в виде трех одинаковых параллельно включенных конденсаторов в корпусе из оргстекла с бумажно-масляной изоляцией. Конденсаторы размещены на одинаковом расстоянии с трех сторон от конструкции из последовательно соединенных трехэлектродной разрядной камеры и обостряющего искрового разрядника, состоящего из двух одинаковых тринадцатизазорных частей (каждый зазор ~ 2 мм). Внешний диаметр дискообразных электродов разрядника равен наружному диаметру фторопластового корпуса разрядной камеры. Поверхности корпусов конденсаторов отстоят от наружных поверхностей электродов разрядника и корпуса разрядной камеры на 10 мм.

Таким образом, выходной каскад образует почти прямоугольный (нет четвертой стороны) коаксиальный замкнутый контур, внешним проводником которого являются три параллельно включенных конденсатора, а внутренним — последовательное соединение разрядной камеры с разрядником. С четвертой стороны к разрядной камере подходят трубопроводы (шланги) с обрабатываемым продуктом, а также делитель напряжения для измерения параметров рабочих импульсов. В данной конструкции выходного разрядного контура удалось получить длительность фронта импульса напряжения в разрядной камере с водой 10 нс.

В [4] уделяется внимание проблеме ограничения температуры в разрядной камере для максимального сохранения биологической ценности пищевых продуктов. Практически это осуществляется путем охлаждения электродов камеры в процессе обработки проточной холодной водой через систему специальных отверстий и полостей в электродах. Однако при большой производительности и,

соответственно, при больших средних скоростях ввода энергии в продукт последний нагревается быстро и равномерно по всему объему, а охлаждается только через поверхность электродов. Такое охлаждение малоэффективно и, по нашему мнению, нецелесообразно, поскольку быстро нарастающая до максимума температура (за $\sim 0,1$ с и менее) без выдержки на максимуме наряду с сильным импульсным электрическим полем оказывает инактивирующее действие на микроорганизмы и весьма слабо влияет на биологическую и пищевую ценность продуктов. Проведенная экспериментальная проверка влияния охлаждения электродов разрядной камеры на результаты импульсной обработки в технологическом (высокопроизводительном) режиме жидкостей, обсемененных показательными микроорганизмами, подтвердила наш вывод.

До недавнего времени установки, генерирующие высоковольтные импульсы с подобными параметрами, работали в режиме однократных импульсов (частота следования импульсов редко превышала 1 импульс в минуту). Эти установки использовались для исследовательских (в ускорительной технике) или испытательных (проверка изоляции, стойкость к электромагнитным импульсам) целей. Обычно такие установки размещались на соответствующих исследовательских площадках, объект испытаний размещался на испытательном поле с возможностью визуального наблюдения за ним. Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала установки снабжаются защитными ограждениями, расположенными на соответствующем расстоянии от токоведущих частей (например от проводников, находящихся под напряжением 150 кВ, на расстоянии не менее 1,5 м). Такие установки занимают достаточно большие производственные площади. Использование аналогичных ограждений для технологической установки не оправдано ни с технической, ни с экономической точки зрения.

Возникающие во время генерации высоковольтных импульсов электромагнитные поля в окружающем пространстве создают значительные помехи и могут приводить к сбоям в работе радиоэлектронных устройств. Когда речь идет о технологической высоковольтной импульсной установке, требования по электромагнитной защите персонала и поме-

хозащищенности различных устройств резко возрастают. Это обусловлено тем, что, во-первых, обслуживающий персонал, средства измерения, контроля и управления самой установки находятся в непосредственной близости от источника электромагнитных полей, во-вторых, резко возрастает частота посылок импульсов, т.е. увеличивается средняя мощность излучений, в третьих, технологическая установка не должна оказывать влияния на работу других радиоэлектронных устройств, находящихся поблизости от установки. Поэтому при разработке технологической высоковольтной импульсной установки необходимо решить задачу защиты обслуживающего персонала и радиоэлектронных устройств от возникающих при их работе электромагнитных полей (рис. 3).

Применительно к слаботочным низковольтным радиоэлектронным устройствам такую задачу решают с помощью медного экрана [7]. Причем экранировка будет полной, если выбрать соответствующую толщину стенок экрана, а сам экран запаковать. Использование подобного экрана в данном случае неудобно, так как экран должен быть разъемным для обеспечения доступа ко всем элементам установки в процессе эксплуатации, не слишком массивным при характерном линейном размере ~ 1 м и, кроме того, применение меди приводит к удорожанию установки.

С учетом рекомендаций [8] для установки был разработан и выполнен разъемный сплошной

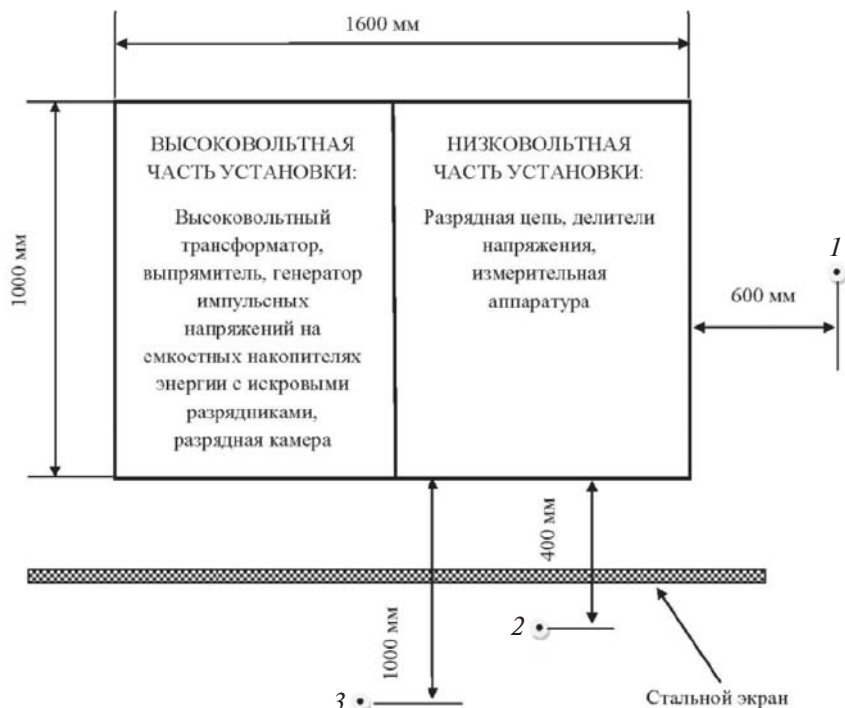


Рис. 3. Схематическое изображение высоковольтной импульсной установки технологического назначения с указанием электромагнитных помех на разных расстояниях от источника

(замкнутый гальванически) экран из тонколистового луженого железа. Для уменьшения площади экрана, а также для уменьшения габаритов и для улучшения эксплуатационных характеристик она была перекомпонована. «Линейный» вариант генератора импульсов, где конденсаторы, разрядники и нагрузка (рабочая камера) располагались друг за другом вдоль прямой линии – направления, по которому энергия передавалась от первого накопительного конденсатора в нагрузку, был преобразован в «этажерочный», где конденсаторы и разрядники расположены друг над другом. При этом в $\sim 1,5$ раза уменьшился объем, занимаемый элементами генератора. Кроме того, стал легче доступ к искровым воздушным разрядникам для осмотра, обслуживания и перестройки, поскольку все разрядники сосредоточены с одной стороны генератора.

Основой изготовленного экрана служит сварной каркас из стального уголка 32×32 мм с габаритами $1600 \times 1400 \times 1000$ мм. Каркас обшит (кроме нижней плоскости) соединенными гальванически полосами луженого железа шириной 320 мм и толщиной 0,3 мм. Гальваническое соединение полос обеспечивается отбортовкой и развальцовкой по краям полос. Полученный кожух был одет на каркас подставки установки и соединен с ним винтами М5, размещенными по периметру каркаса с шагом 150 мм. Со стороны рабочей камеры (для удобства эксплуатации) в кожухе выполнена дверь (также обшита луженым железом) размером 880×1000 мм. Дверь поворачивается на петлях с возможностью плотного прижатия до создания гальванического контакта по всему своему периметру к кожуху установки с помощью четырех зажимов с использованием резьбовых соединений «шпилька–гайка».

Подставка установки, где размещена низковольтная силовая часть, также обшита луженым железом до пола по всему периметру каркаса. Высоковольтный вывод питающего трансформатора ТВО-140 также имеет выполненный из луженого железа замкнутый кожух, гальванически соединенный по периметру с крышкой трансформатора и с кожухом генератора. Низковольтные выводы трансформатора закрыты отдельным кожухом. Таким образом, все экранирующие и защитные кожухи установки соединены гальванически и заземлены, т.е., высоковольтная импульсная установка стала полностью электробезопасной при меньшей занимаемой производственной площади, так как отпала необходимость в защитном ограждении.

Были проведены измерения для оценки электромагнитного фона при работе установки без защитного экрана. Замеры уровня электромагнитных полей проводились дифференциальным датчиком с чувствительностью $10 \text{ мВ}/(\text{кВ}/\text{м})$. Точки замеров

электромагнитных полей выбирались на высоте 1,2 м от пола: 1 – на расстоянии 0,6 м напротив двери кожуха; 2 и 3 – 0,4 м и 1 м от боковой стенки установки. Расстояния указаны от краев каркаса, на котором смонтированы узлы установки. Типичные осциллограммы импульсов напряженности в указанных точках приведены на рис. 4 (фиксировалась вертикальная составляющая поля). Импульсы по форме напоминают аperiodические импульсы в рабочей камере установки.

Как видно из рис. 4, наибольшая напряженность поля наблюдается вблизи установки в месте расположения активной части высоковольтного генератора (высоковольтные конденсаторы и разрядники) – кривая 2 – $E \approx 15 \text{ кВ}/\text{м}$. Уровень поля сильно снижается при удалении от установки на 1 м – кривая 3 – $E < 4 \text{ кВ}/\text{м}$. Размещение стального листа площадью $2 \times 2 \text{ м}^2$ толщиной 1,5 мм между боковой частью каркаса установки и точкой измерения приводит примерно к пятикратному уменьшению напряженности поля. Осциллограмма импульса напряженности в точке 2 для этого случая представлена на рис. 5, из которого следует, что помимо уменьшения амплитуды изменилась и форма импульса–помехи с аperiodической на колебательную с сильным затуханием.

В отсутствие защитного электромагнитного экрана вблизи установки в работе полупроводнико-

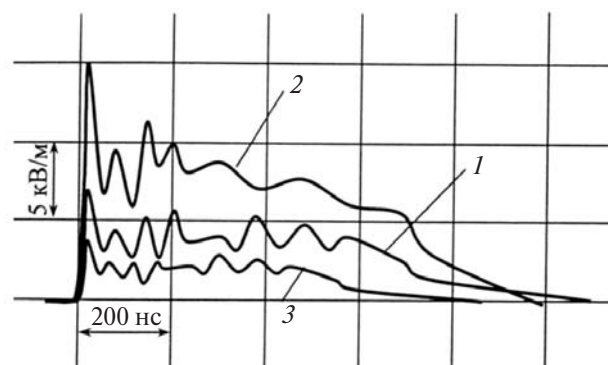


Рис. 4. Осциллограммы электромагнитных полей на различных расстояниях от высоковольтной установки

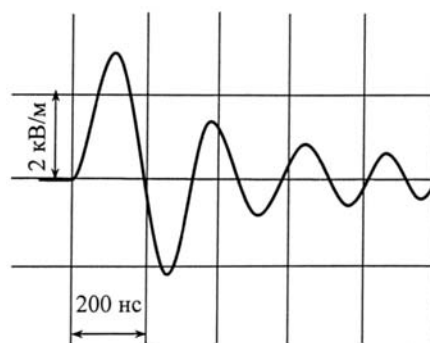


Рис. 5. Осциллограмма напряженности электромагнитного поля при наличии стального экрана

вых электронных устройств, например регистрирующих электронных осциллографов, наблюдались срывы, сбои. Правда, по истечении некоторого времени функционирование устройств восстанавливалось. Так было при съемке работы установки видеокамерой. Провести съемку без сбоев в работе видеокамеры удалось только через трубчатое окошко диаметром 35 мм передвижной стальной двухслойной измерительной кабины, удаленной на 15 м от установки.

Следует подчеркнуть важность влияния на стойкость электронных средств, в том числе и измерительных, к воздействию импульсных электромагнитных помех частоты следования последних. При возрастании частоты следования до ~ 500 Гц наблюдается явный кумулятивный эффект от помех, приводящий к резкому снижению стойкости электронных средств и, следовательно, к повышению требований к качеству экранирования.

При использовании рассматриваемого экранирующего защитного кожуха во время работы технологической импульсной установки с частотой следования импульсов 500 Гц не наблюдалось каких-либо сбоев или отказов в функционировании полупроводниковых средств управления и электронных измерительных средств, т.е., изготовленный кожух в этом аспекте позволил решить поставленную задачу.

В разработанной установке в качестве коммутирующих элементов используются воздушные искровые разрядники. Работа разрядников сопровождается значительным шумом, который несколько снижается из-за наличия экранирующего кожуха. Для снижения шумов до допустимого уровня на внутренней поверхности экранирующего кожуха расположены плотно стыкующиеся листы пористого электрозвукоизоляционного материала (например, винипор эластичный марки Д) толщиной 50 мм. В нижней части и в крыше экранирующего кожуха выполнены вентиляционные отверстия в виде лабиринтов, внутренние поверхности которых покрыты таким же электрозвукоизоляционным материалом. Эти отверстия служат для создания естественного воздушного потока через высоковольтную часть установки. При этом воздушный поток способствует охлаждению электродов искровых разрядников и выносу из зоны коммутации продуктов горения электрического разряда и озона. В промышленных условиях для интенсификации этих процессов возможно подсоединение нижнего вентиляционного отверстия к воздуходувке, а верхнего – к вентиляционному ходу здания.

Было также проведено обследование акустических показателей установки. Примененный на установке звукоизоляционный кожух снижает уро-

вень звука с 110 дБА (при открытой двери) до 78 дБА, что меньше допустимого уровня звука (80 дБА) для производственных помещений [10]. Обшивка экранирующего кожуха изнутри электроизоляционным материалом заметной толщины (50 мм) с диэлектрической проницаемостью, существенно превышающей диэлектрическую проницаемость воздуха, приводит к дополнительному увеличению экранирующего эффекта [8].

Для оценки электромагнитных полей вокруг установки после применения защитного кожуха был использован оптоэлектронный измеритель напряженности электрического поля с чувствительностью 10 мВ/(В/м). Результаты измерений в точках 1 и 3 (рис. 3) приведены в таблице.

Точка измерения	Максимальное значение составляющих электрического поля, В/м		
	вертикальная	горизонтальная	
		продольная	поперечная
С открытой дверью			
1	450	300	340
3	400	200	260
С закрытой дверью			
1	250	150	100
3	100	50	75

Как видно из таблицы, различия в уровнях помех при закрытой и открытой двери кожуха установки лежат в пределах 1,5–3,5 раз для различных составляющих напряженности поля. Такой разброс связан, вероятно, с суперпозицией полей, вызванной наличием различных металлических поверхностей в помещении, где размещена установка.

По результатам измерений при закрытой двери кожуха на расстоянии 2 м от корпуса-кожуха установки в любую сторону уровень помех по любой из трех составляющих не превышает 40 В/м, на расстоянии 4 м – 20 В/м, а на расстоянии 10 м от установки уровень полезного сигнала с датчика не превышает уровень шумов на экране осциллографа. Использование для кожуха тонколистового луженого железа позволяет за счет его высокой коррозионной стойкости и небольшой стоимости выполнить кожух технологичным, с малыми контактными сопротивлениями на долгий срок службы (не менее нескольких лет) и недорогим. При этом экранирующее действие кожуха позволяет уменьшить напряженность импульсных электромагнитных помех более чем в 100 раз. Таким образом, при работе установки с замкнутым металлическим кожухом – электромагнитным экраном – человек может находиться на удалении не менее 1 м от установки в

течение всего рабочего дня (8 ч непрерывно) без опасности для своего здоровья.

Заключение. По результатам экспериментальных исследований установлено, что высоковольтная импульсная установка технологического назначения, имея низкую индуктивность разрядной цепи, обеспечивает длительность фронта 20 нс на нагрузке 20–100 Ом при частоте следования импульсов до 500 Гц и рабочей напряженности однородного электрического поля в нагрузке 120 кВ/см при рабочем напряжении на нагрузке 120 кВ. Нарботанный ресурс для установки с трансформатором, работающим на переменном напряжении, равен $\sim 3 \times 10^9$ импульсов. Длительность импульсов определялась сопротивлением нагрузки и составляла от 50 до 800 нс. Создаваемые при работе высоковольтных быстродействующих разрядников внутри установки импульсные электромагнитные поля, помехи не влияли на работу элементов генератора. Отказов элементов установки не было.

Повышенный ресурс емкостных накопителей (10^{10} – 10^{11} импульсов – расчетный ресурс) в установке без импульсного трансформатора (ИТ) удалось обеспечить усилением изоляции выводов и изоляции в пакете и, следовательно, некоторым увеличением индуктивности конденсаторов, что привело к удлинению фронта импульсов на нагрузке в $\sim 1,5$ раза (до 20 нс). Экспериментальная проверка генератора показала, что амплитуда импульсов на нагрузке не изменяется вплоть до частоты следования ~ 50 Гц. На более высоких частотах амплитуда снижается. При этом форма импульсов стабильна при любой экспериментально проверенной частоте следования импульсов. В установке с ИТ импульсы напряжения на нагрузке – рабочей камере – гораздо более стабильны по амплитуде, чем в установке без ИТ.

Рабочая камера допускает рабочие напряженности до 120 кВ/см при ресурсе $\sim 10^{10}$ – 10^{11} импульсов. При рабочей напряженности > 200 кВ/см и длительности импульсов 200–600 нс ресурс камеры резко уменьшается (до 10^7 импульсов и менее). Близость рабочих напряженностей к электрической прочности продуктов, заполняющих камеру, повышенная вероятность электрических пробоев продуктов приводят к быстрому выходу из строя рабочей камеры. Корпуса рабочих камер могут быть изготовлены из фторопласта или полиэтилена. Последний не допускает нагрева выше 85–90 °С, так как размягчается при этих температурах, что приводит к уменьшению межэлектродного зазора и нежелательным пробоям в обрабатываемом продукте. Рабочий объем камер варьировался от 10 до 250 мл. Экспериментально достигнута скорость нагрева

жидкости в камере в проточном режиме 50 °С за десятые доли секунды.

Электроды рабочей камеры, соприкасающиеся с продуктом, могут изготавливаться из пищевой нержавеющей стали марки 08Х17Т, титана марки ВТ1-0 или алюминия марки А7 в зависимости от обрабатываемого продукта. Следы электролиза в обработанном продукте и в камере не обнаружены. Поверхность электродов повреждалась только случайными разрядами при напряженности поля, превышающей критическую.

С помощью опытной установки без ИТ экспериментально доказана возможность увеличения ресурса искровых разрядников до значения $> 10^9$ импульсов путем обеспечения многоканальности искрового разряда в каждом разряднике, т.е. когда каналы срабатывают поочередно (одновременно – часть или один из десяти) с равной вероятностью при частоте следования импульсов до 500 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбанов Э.Д. Роль диэлектрических насадок в формировании наносекундных импульсных разрядов в плотном воздухе. – *Электричество*, 2009, № 4, с. 60–65.
2. Курбанов Э.Д. Комплексное исследование характеристик наносекундного стримерного разряда в резконеоднородном поле при наличии в промежутке диэлектрических пластин. – *Известия НАН Азербайджана (Баку)*, 2009, т. 29, № 5, с. 78–93.
3. Кужекин И.П., Курбанов Э.Д. Сильные электрические поля и импульсные разряды в воде. – *Вестник МЭИ*, 2008, № 2, с. 33–36.
4. Barbosa-Canovas G.V., Gongora-Nieto M.M., Pothakamury U.R., Swansson B.G. Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields. – Washington, San Diego: Academic Press, 1999, 200 p.
5. Sensoy I., Zhang Q.H. and Sastry S.K. Inactivation kinetics of Salmonella Dublin by pulsed electric field. – *J. Food Process. Eng.*, 1997, vol. 20, pp. 367–381.
6. Gashimov A.M., Kurbanov E.D. The influence of high-voltage impulse treatments on biological cells. – *Surface Engineering and Applied Electrochemistry (USA)*, 2009, vol. 45, No. 5, pp. 411–414.
7. Термен Ф., Петтит Дж. Измерительная техника в электронике/Пер. с англ. Под ред. В.Т. Фролкина. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1955, 604 с.
8. Шваб А.И. Электромагнитная совместимость/Пер. с нем. Под ред. И.П. Кужекина. – М.: Энергоатомиздат, 1998, 480 с.
9. Методические указания по проведению измерений и гигиенической оценке шумов на рабочих местах. – М.: Министерство здравоохранения СССР, 1978, 18 с.

[27.11.15]

Автор: Гурбанов Эльчин Джалал оглы окончил факультет электронной техники Московского энергетического института (МЭИ) в 1986 г. В 1995 г. защитил кандидатскую диссертацию «Взаимодействие неравновесных электрических разрядов с компонентами композиционных материалов» в Институте физики АН Азербайджана. Ведущий инженер отдела ОАО «Азерсу» (Баку, Азербайджан).

Specific Features Related to Designing High-Voltage Impulse Processing Installations for Treatment of Water-Containing Media in a Flow Mode

GURBANOV Elchin Dzhahal ogly (*JSC «Azersu», Baku, Azerbaijan*) – *Cand. Sci. (Eng.)*

The article deals with elaborating the designs of discharge chambers for studied objects in high-voltage impulse processing installations intended for electronic treatment of water-containing media and with methods for safe operation of high-voltage equipment to protect the maintenance personnel from high-frequency impulse electromagnetic interference. It is shown that in designing working chambers for treating water-containing medium in a flow mode, measures shall be provided to prevent bulk and surface breakdown of the chamber and to shield the high-voltage installation over its entire perimeter to ensure safe work of the maintenance personnel.

Key words: *high-voltage installation, working chamber, impulse discharge, water-containing medium, load*

REFERENCES

1. Kurbanov E.D. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2009, No. 4, pp. 60–65.
2. Kurbanov E.D. *Izvestiya National'noi Akademii nauk Azerbaidjana (Baku)* (Proc. of Azerbaidjan Academy of Sciences), 2009, vol. 20, No. 5, pp. 78–93.
3. Kuzhekin I.P., Kurbanov E.D. *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of the MPEI)*, 2008, No. 2, pp. 33–36.
4. Barbosa-Canovas G.V., Gongora-Nieto M.M., Pothakamury U.R., Swansson B.G. *Preservation of Foods with Pulsed Electric Fields*. – Washington, San Diego: Academic Press, 1999, 200 p.
5. Sensoy I., Zhang Q.H. and Sastry S.K. Inactivation kinetics of Salmonella Dublin by pulsed electric field. – *J. Food Process. Eng.*, 1997, vol. 20, pp. 367–381.

6. Gashimov A.M., Kurbanov E.D. The influence of high-voltage impulse treatments on biological cells. – *Surface Engineering and Applied Electrochemistry (USA)*, 2009, vol. 45, No. 5, pp. 411–414.

7. Termen F., Pettit J. *Izmeritel'naya tekhnika v elektronike/Per. s angl. Pod red. V.T. Frolkin* (Measuring equipment in electronics/Trans. from Engl. Edit. by V.T. Frolkin). Moscow, Foreign Literature Publishing House, 1955, 60, 604 p.

8. Shvab A.Y. *Elektromagnitnaya sovместimost'/Per. s nemets. Pod red I.P. Kuzhekin* (Electromagnetic compatibility. Tras. from the German. Edit. By I.P. Kuzhekin). Moscow, Publ. «Energoizdat», 1998, 480 p.

9. *Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu izmerenii i gigienicheskoi otsenke shumov na rabochikh mestakh* (Guidelines for the measurement and assessment of noise hygiene in the workplace). Ministry of Health of USSR, 1978, 18 p.

* * *

II Международная научно-техническая конференция

«Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике» (21–22 апреля 2016 г., Пермь)

Организаторы конференции:

Министерство образования и науки Российской Федерации

Академия электротехнических наук Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИИ

20.12.2015–15.04.2016 г. – приём и рассмотрение заявок на участие в конференции.

21.04.2016–22.04.2016 г. – работа конференции.

01.05.2016–31.07.2016 г. – подготовка и публикация сборника материалов конференции.

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ:

Секция 1. Автоматизация в электроэнергетике и автоматизированный электропривод.

Руководители секции – д-р техн. наук А.М. Зюзов, д-р техн. наук Б.В. Кавалеров.

Секция 2. Электромеханические системы.

Руководители секции – д-р техн. наук В.Я. Беспалов, д-р техн. наук Н.В. Шулаков.

Секция 3. Электротехнологические системы.

Руководители секции – д-р техн. наук В.Э. Фризен, д-р техн. наук Ф.Н. Сарапулов.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес оргкомитета: 614000, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, к. 351, кафедра электротехники и электромеханики. Контактное лицо – Маталасова Елена Афонасьевна.

Тел.: +7 (342) 219 80 57, факс: +7 (342) 219 80 57, E-mail: Shulakov@pstu.ru

