

УДК 537.523.3:621.374:66.074.5

**Л. З. БОГУСЛАВСКИЙ** (канд. техн. наук), **В. В. ДИОРДИЙЧУК**, **Д. В. ВИННИЧЕНКО**,  
**Н. С. НАЗАРОВА** (канд. техн. наук, доц.)

**Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины**  
**redlineone@rambler.ru**

## **АНАЛИЗ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ПО ОЧИСТКЕ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ**

*Проведен анализ задач управления источниками питания установок по очистке газовых выбросов от экологически вредных примесей. Определены координаты состояния электродинамических процессов в активной зоне очистки. Классифицированы задачи управления и разработаны структурные схемы управления электрическим оборудованием электрофильтров основных промышленных типов.*

*Источник питания электрофильтра, высоковольтный высокочастотный преобразователь, импульсно-периодическое напряжение, система управления источником импульсного питания.*

В последнее время продолжают ужесточаться требования к содержанию пыли и экологически вредных компонентов в газовых выбросах различных производств. В то же время остаются не решенными задачи повышения эффективности очистки от пылевых выбросов, с одной стороны, и интенсификации плазмохимических реакций для нейтрализации экологически опасных веществ в газах, с другой. Все это приводит к необходимости создания нового типа оборудования для газоочистки или поиску решений по модификации уже имеющегося оборудования. Вместе с этим необходимо создавать компьютеризированные системы управления, которые должны обеспечить достаточную производительность нового оборудования.

Представленная работа посвящена задаче синтеза системы управления высоковольтным высокочастотным преобразователем для технологии очистки газовых выбросов, решение которой позволит стабилизировать процесс поддержания объемного разряда в активной зоне очистки.

Целью работы является анализ задач управления источниками питания установок по очистке газовых выбросов от экологически вредных примесей для создания управляемого электрического оборудования электрофильтров, обеспечивающего эффективную очистку воздуха.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать процесс газоочистки как объект управления и определить входные и выходные координаты объекта управления, проанализировать существующие источники питания промышленных установок по газоочистке и задачи, возникающие при их управлении, разработать функциональную блок-схему системы управления высоковольтным высокочастотным преобразователем для поддержки стабильного объемного разряда.

На первом этапе работы по результатам аналитического обзора научно-технической литературы [1, 2] были проанализированы факторы, влияющие на эффективность работы систем газоочистки. Для этого была проведена декомпозиция, позволившая получить три индивидуальные подсистемы: обрабатываемый газ (промышленные выбросы и т.п.), разрядный промежуток, который является электрической нагрузкой системы газоочистки (геометрические и электрофизические параметры), и источники электрического питания систем газоочистки. Все учтенные факторы были разделены на три группы, соответствующие выделенным подсистемам. Каждая группа факторов может быть отражена в координаты состояния процессов, протекающих в соответствующих подсистемах. Первая группа факторов - это параметры обрабатываемого газа. К ним можно отнести: химический состав газа, температуру, давление, плотность, вязкость, скорость потока, концентрацию вредных веществ, размер твердых частиц, удельное электрическое сопротивление твердых частиц и др. Вторая группа обусловлена параметрами активной зоны, в которой непосредственно происходит процесс очистки. В эту группу факторов входят форма коронирующих электродов, длина разрядного промежутка, форма осадительных электродов, количество секций фильтра, распределение электрического поля, распределение объемной плотности тока, очистка от осажденной пыли, размер активной зоны. К наиболее значимым параметрам этой группы следует отнести распределение напряженности электрического поля и распределение объемной плотности тока. Для рассматриваемой работы наибольший интерес представляет третья группа факторов, связанных непосредственно с системой питания. К ним относятся рабочее напряжение, ток нагрузки, мощность, форма выходного напряжения, частота искровых разрядов. Важнейшим параметром в этой группе остаётся рабочее напряжение, но также следует обратить внимание на такие факторы, как форма выходного напряжения и частота искровых разрядов.

Проанализируем факторы, относящиеся к системе питания. Основным параметром, влияющим на производительность электрофильтра, по результатам многочисленных исследований [2, 3, 4] является рабочее напряжение. Из [2] известна зависимость скорости дрейфа пылевой частицы, которая пропорциональна квадрату рабочей напряженности электрического поля:

© Богуславский Л. З., Диордийчук В. В., Винниченко Д. В., Назарова Н. С., 2011

$$\omega_{th} = E^2 \cdot d_p \cdot C_0 / \eta, \quad (1)$$

где  $\omega_{th}$  – теоретическая скорость дрейфа частицы,  $E$  – напряженность электрического поля,  $d_p$  – диаметр частицы,  $C_0$  – коэффициент Канингама,  $\eta$  – вязкость газа.

В свою очередь значение скорости дрейфа частицы входит в выражение для КПД электрофильтра:

$$\text{КПД} = 1 - \exp(-\omega_{th} \cdot f), \quad (2)$$

где  $f$  – удельная площадь осаждения.

Таким образом, производительность электрофильтра зависит от квадрата напряжения питания.

С другой стороны, максимальное рабочее напряжение ограничено уровнем пробивного напряжения. Таким образом, для наилучшей производительности электрофильтра напряжение питания должно быть как можно ближе к пробивному.

В последнее время активно исследуется влияние формы питающего напряжения на качество очистки. Традиционно в системах очистки используется высокое выпрямленное напряжение (порядка десятков киловольт). Так как нагрузкой выпрямителя является емкость электродной системы, то выходной фильтр нижних частот не используется. В результате форма выпрямленного напряжения на электродной системе зависит от частоты напряжения питания. Поэтому мы можем говорить о трех типичных формах питающего напряжения [3, 5, 6]. Первая форма – пульсирующее напряжение частотой 100 Гц на выходе мостового выпрямителя, подключенного к выходу 50-ти герцевого повышающего трансформатора. Наличие пульсаций рабочего напряжения не позволяет выставить его как можно ближе к пробивному и, таким образом, максимальная производительность не может быть обеспечена. Для уменьшения пульсаций целесообразно использовать значительное повышение частоты работы трансформатора. Кроме прогнозируемого уменьшения массо-габаритных размеров повышающего трансформатора, повышение частоты приводит к уменьшению отношения периода напряжения к постоянной времени разряда электродной системы фильтра, что позволяет сгладить форму выходного напряжения и снизить амплитуду пульсаций до единиц киловольт. Сглаженную форму напряжения назовем второй формой. Такая форма может быть обеспечена источником питания с промежуточным преобразованием частоты, она значительно лучше, поскольку точно установленное сглаженное напряжение можно максимально приблизить к уровню пробивного. И третья форма питающего напряжения – импульсно-периодическая, представляющая собой базовое высокое напряжение, на которое с заданной частотой накладываются дополнительно высоковольтные импульсы. Такая форма обеспечивается сложными источниками питания, которые по сути дела состоят из двух: первый – источник постоянного базового напряжения, которое значительно ниже пробивного, и второй – импульсный, который обеспечивает импульсы напряжения на нагрузке. Такая форма напряжения по данным литературных источников [7] позволяет бороться с эффектом "обратной короны", возникающим при осаждении высокоомных частиц, а также интенсифицировать плазмохимические реакции нейтрализации вредных соединений. Однако до настоящего времени не получены зависимости качества очистки промышленных выбросов от параметров импульсно-периодической формы рабочего напряжения.

Также информативным параметром процесса очистки является частота искровых разрядов. По различным литературным источникам [4, 2] зависимость эффективности очистки от этой частоты имеет качественно одинаковую картину. В принципе этот параметр можно рассматривать как следствие зависимостей (1) и (2). Выпуклую форму кривой зависимости эффективности очистки от частоты искрений можно объяснить тем, что подъем эффективности обеспечивается подъемом рабочего напряжения, а искрения являются следствием локальных перенапряженностей в активной зоне. Поэтому убывающая ветвь характеристики объясняется тем, что из-за искрений и ограниченной мощности источника питания среднее рабочее напряжение электрофильтра падает, поскольку не удается мгновенно или достаточно быстро перезарядить емкость электродной системы.

Следующим немаловажным фактором очистки является ток в нагрузке и, соответственно, потребляемая мощность. Уменьшение тока нагрузки указывает на ряд негативных факторов, в частности, показывает появление "обратной короны".

Отдельным фактором может быть выделена мощность, достаточный уровень которой обеспечивает быстрый перезаряд емкости электродной системы, тем самым уменьшая время работы фильтра на напряжениях, меньших номинального, и увеличивая эффективность очистки.

Таким образом, к координатам состояния электродинамических процессов в цепи источника питания и его нагрузки можно отнести все перечисленные параметры. При этом в качестве информационных координат могут использоваться выходное напряжение на электродной системе, ток нагрузки, частота искрений в активной зоне, а в качестве управляющих координат – форма и уровень выходного напряжения, а также мощность источника.

Анализ существующих источников питания, применяющихся в промышленных установках по газоочистке, позволил сформулировать задачи их управления. Используемые источники питания можно разделить на три типа, которые, в частности, обеспечивают рассмотренные выше формы питающего напряжения. Первый классический тип источника питания (рис.1,а) имеет в своем составе высоковольтный трансформатор, работающий на частоте питающей сети, и мостовой выпрямитель. Входное напряжение и

мощность источника можно задавать с помощью регулятора тока и напряжения. Таким регулятором может служить автотрансформатор, магнитный усилитель или тиристорный регулятор. Входными координатами системы управления таким типом источников является величина тока, протекающего через электрофильтр, и напряжение на электрофильтре. Задачей системы управления является стабилизация этих параметров на нагрузке за счет изменения величины входного напряжения и мощности. Структура соответствующей системы управления будет иметь блоки, показанные на рис.1,б.

Второй тип источников - это источники с промежуточным высокочастотным преобразованием энергии (рис.1,в). Управление таким типом источника можно свести к одноканальному. Фактически, задавая время открытого и закрытого состояния полупроводниковых ключей, то есть скважность  $D$ , по одному управляющему каналу можно управлять входным напряжением и мощностью в зависимости от величины информационных сигналов. Структура соответствующей системы управления будет иметь блоки, показанные на рис.1,г.

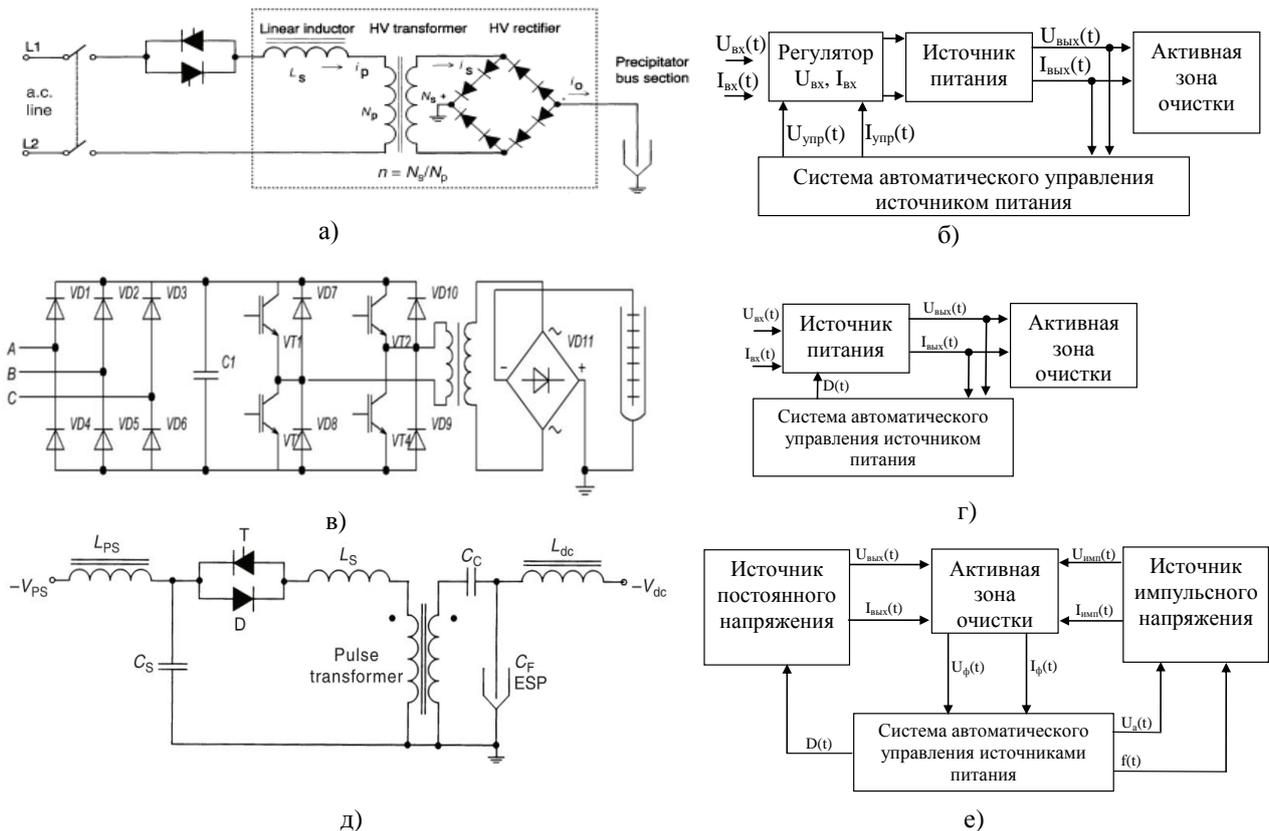


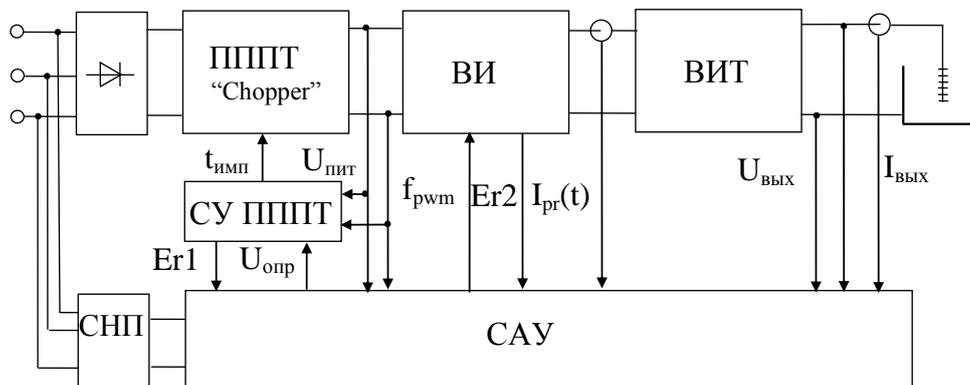
Рисунок 1 - Источники питания электрофильтров и блок-схемы соответствующих им систем управления

Третий тип источников - источники импульсного питания - по существу представляют собой два источника напряжения: соответственно импульсного и постоянного. На рис.1,д приведен один из вариантов его топологии, существуют также другие схемы таких источников. На данный момент проблемной является задача разработки систем управления для таких источников, поскольку пока недостаточно данных по влиянию величины постоянной составляющей напряжения, формы, амплитуды и временных характеристик импульсов напряжения, частоты повторения импульсов. Поэтому на начальном этапе ставится задача создания аппаратных и программных средств для осуществления управления всеми перечисленными параметрами, а законы управления будут определяться на основе результатов исследований, проведенных с помощью разработанной аппаратной базы системы управления. Система управления таким источником становится на порядок сложнее, в частности, из-за того, что необходимо регистрировать уже не уровень питающего напряжения, а также его форму. Структура соответствующей системы управления будет иметь блоки, показанные на рис.1,е.

На основе проведенного анализа факторов, влияющих на эффективность электрофильтрации, и на основе анализа топологий источников питания и их систем управления были сформулированы требования к функциям системы управления. Основными функциями системы управления являются регулирование напряжения питания, стабилизация напряжения питания на уровне, близком к пробивному, ограничение тока пробоя, восстановление рабочего напряжения после пробоя, ограничение потребляемой мощности. Дополнительными функциями системы управления являются мониторинг изменения вольт-амперной характеристики нагрузки, мониторинг частоты искровых пробоев в активной зоне, контроль возникновения эффекта "обратной короны", контроль потребляемой мощности. Следует отметить, что реализация дополнительных функций системы управления является возможной только при реализации основных.

Проведем подробный анализ высоковольтного высокочастотного импульсного генератора [8], который можно рассматривать, с одной стороны, как самостоятельную систему питания для установок газоочистки, а с другой стороны - как источник импульсного напряжения в составе системы импульсного питания, показанной на рис.1,е. На рис.2 приведена блок-схема силовой части источника питания с системой управления (рис.2,а) и внешний вид электрооборудования (рис.2,б).

Силовая часть генератора состоит из трехфазного выпрямителя, понижающего преобразователя последовательного типа (ПППТ), который выполняет функции стабилизации и регулирования напряжения питания высокочастотного инвертора (ВИ). В состав генератора также входит высокочастотный инвертор, который преобразует постоянное напряжение питания в импульсную форму, и высоковольтный импульсный трансформатор. Следует отметить такую особенность – источник питания не имеет каких-либо элементов на вторичной стороне трансформатора.



а)



б)



Рисунок 2 - Блок-схема силовой части источника питания с системой управления (а) и внешний вид электрооборудования (б)

Разработана функциональная схема системы управления генератором, которая функционально разделена на 2 части. Первая – система управления понижающим преобразователем (СУ ПППТ), она обеспечивает установку и стабилизацию напряжения питания высокочастотного инвертора и является подчиненной по отношению ко второй части – к общей системе автоматического управления источником (САУ). Общая система автоматического управления в зависимости от тока и напряжения нагрузки варьирует напряжение питания высокочастотного инвертора и при необходимости частотой инвертирования, следит за током в первичной цепи трансформатора, а также отслеживает сигналы ошибки от драйверов силовых ключей.

**Выводы.** Проведенный анализ задач управления источниками питания установок по очистке газовых выбросов от экологически вредных примесей позволил определить координаты состояния электродинамических процессов в цепи источника питания и его нагрузки, классифицировать задачи управления и разработать структурные схемы управления электрическим оборудованием электрофильтров, обеспечивающие эффективную очистку воздуха.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев Г.М.А. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров / Г.М.А. Алиев, А.Е. Гоник. - М.: Энергия, 1971.
2. Parker K. Electrical operation of electrostatic precipitator // IEE power & energy, 2003. - Series no. 41.
3. Liang X. Pulse corona application for the collection of mercury from FLUE GAS / X. Liang, S. Jayaram, P. Looy, A. Berezin, J.S. Chang // Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.
4. Алиев Г.М.А. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров / Г.М.А. Алиев, А.Е. Гоник – М.: Энергия, 1968.
5. Chambers M. 21st Century ESP Design: Synergism of Old and New Concepts / Chambers M., Chaney J. R., Grieco G. J. – July 2009.

6. Abramzon E., A hv pulse generator for driving pulsed corona discharge / Wolf M., Pokryvailo A., Yankelevich Y. – Propulsion Physics Laboratory, Soreq NRC, Yavne 81800, Israel.
7. Katayama H. Electrostatic presipitation technology with new energization system/ Katayama H., Sugiura S., Tsuchiya Y., Tamai M., Kawabata O.// Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. – Technical review Vol. 32 — No.1. - Feb., 1995.
8. Богуславский Л.З. Высоковольтное оборудование для реализации стабильных стримерных разрядов в системах газоочистки / Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н., Казарян Ю.Г. // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Сучасна електроніка і енергоефективність", 2010. - Ч.1. - С.55-58.

Надійшла до редколегії 18.03.2011

Рецензент: О.П.Ковальов

Л. З. БОГУСЛАВСЬКИЙ, В. В. ДІОРДІЙЧУК,  
Д. В. ВІННИЧЕНКО, Н. С. НАЗАРОВА  
Інститут імпульсних процесів і технологій  
НАН України

L. BOGUSLAVSKIY, V. DIORDIYCHUK,  
D. VINNICHENKO, N. NAZAROVA  
Institute of Pulse Process and Technologies  
of Ukraine NAS

**Аналіз задач керування джерелами живлення устаткування по очищенню газових викидів від екологічно шкідливих домішок.** Проведено аналіз задач керування джерелами живлення установок по очищенню газових викидів від екологічно шкідливих домішок. Визначені координати стану електродинамічних процесів в активній зоні очищення. Класифіковано задачі керування та розроблені структурні схеми керування електричним устаткуванням електрофільтрів основних промислових типів.

**Джерело живлення електрофільтру, високовольтний високочастотний перетворювач, імпульсно-періодична напруга, система керування джерелом імпульсного живлення.**

**The Analysis of the Control Problems of the Power Supply Systems for an Installations for Exhaust Gas Cleaning from Ecologically Hazard Substances.** The analysis of the control problems of the power supply systems for an installations for gas emissions cleaning from ecologically hazard substances is completed. The coordinates of state of an electrodynamic processes in an active cleaning zone is defined. The control problems is classified and stucture schemes of control for electric equipent for basic industrial types of an electrostatic precipitators is developed.

**Electrostatic precipitator supply source, high-voltage high-frequency converter, pulse-periodic voltage, pulse supply source's control system.**