

УДК 502/504:631.3

В. Ф. СТОРЧЕВОЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ИОНИЗАТОРА-ОЗОНАТОРА

Рассмотрены задачи моделирования переходных электрических режимов и составляющих их процессов, происходящих в ионизаторе-озонаторе. Определены: режимы работы системы; процессы образования озона и ионов в разрядном промежутке; стабильная работа системы при ее эксплуатации в производственных условиях.

Источник питания, ионизатор-озонатор, микроклимат, переходные процессы, математические модели, схемы замещения, алгебраические и дифференциальные уравнения.

There are considered simulation problems of transitional electric modes and components of their processes occurring in the ionizer – ozonizer. The following is in the discharge gap; determined: modes of the system operation, processes of ozone and ions formation and ions in a digit interval; steady work of the system under production conditions.

Power supply, ionizer- ozonizer, microclimate, transients, mathematical models, equivalent circuits, algebraic and differential equations.

Система «источник питания – ионизатор-озонатор» используется в производственных, птицеводческих и животноводческих закрытых помещениях для улучшения микроклимата. Стационарные процессы, происходящие в данной системе, имеют сложный характер.

Стабильная работа системы при ее эксплуатации в производственных условиях зависит от процессов, проходящих в ней. Поэтому задачи, связанные с изучением и моделированием переходных электрических режимов и составляющих их процессов, сводятся в основном к определению изменений токов, напряжений и мощностей во времени при соблюдении характеристик номинальных режимов. Без знания нормального исходного режима, при котором начинаются переходные процессы, и установившегося аварийного режима, их заканчивающего, нельзя

иметь достаточно полного представления о работе изучаемой системы и ее переходных режимах [1].

Режим характеризуют параметры системы Π_c ($\Pi_c = X_L, X_c, R$ и т.д.) и параметры процессов $\Pi_{пр}$ ($\Pi_{пр} = I, U, P, Q$ и т.д.). Параметры системы как совокупность элементов, обладающих определенными физическими свойствами, могут рассматриваться так:

не изменяющиеся ($\Pi_c = \text{const}$) в условиях исследуемого процесса – в этом случае их называют линейными;

зависящие от параметров процессов $\Pi_c = f(\Pi_{пр1}, \dots, \Pi_{прn})$, т. е. нелинейные;

вероятностно-детерминированные, т. е. такие, которые могут быть постоянными и изменяться в зависимости от времени или какого-либо параметра процесса по определенному (известному) закону;

имеющие некоторые случайные

изменения, не отвечающие какому-либо вероятностному закону – в этом случае говорят о системе параметров, заданных с разбросом, называемых размытыми или неопределенными.

Переходные и установившиеся процессы описываются системами алгебраических и дифференциальных уравнений. Системы алгебраических уравнений вида $\varphi = (P_{np}, \dots, P_c, \dots) = 0$ связывают между собой параметры системы и параметры ее установившегося (квазиустановившегося) режима.

Для изучения переходных процессов, как правило, составляют системы дифференциальных уравнений:

$$dP_{np} / dt = \psi (P_{np}, \dots, P_c).$$

Во время переходных процессов в системе происходит изменение эдс, токов, напряжения, следовательно, одновременно изменяются уровни энергии, запасенной во всех электрических элементах системы. Для проведения исследований этих процессов, которые протекают в природе, необходимо создать модели.

Моделирование переходных процессов в системе состоит из четырех уровней допущений:

1 – феноменологическая, или общая модель, в которой, при определенных допущениях, дают словесное или подкрепленное количественными соотношениями описание процессов, отобранных для изучения;

2 – математическое описание, если это невозможно или затруднено, то применяют экспериментальное изучение с использованием методов планирования опытов или анализа размерности;

3 – создаются конкретные модели: математические (представляются системой дифференциальных уравнений), в которых содержатся алгоритмы и программы для решения, набор начальных и граничных условий; физические и аналоговые модели предусматривают апробацию и проверку полученных результатов с помощью опытов, корректируемых натурными экспериментами;

4 – обработка данных модели, трактовка полученных решений, их обобщение и интерпретация в форме, удобной для сопоставления и выводов.

Таким образом, решая в комплексе поставленные задачи и учитывая уровни допущений, можно более полно отразить

переходные и установившиеся процессы, что позволит использовать систему в номинальном режиме работы схемы «источник питания – ионизатор-озонатор локального типа».

Представленные схемы замещения коронной и барьерной разрядных систем позволяют построить эквивалентную схему замещения «источник питания – ионизатор-озонатор», которая позволит отобразить и проанализировать основные процессы и режимы работы всей системы (рис. 1а, б) [2].

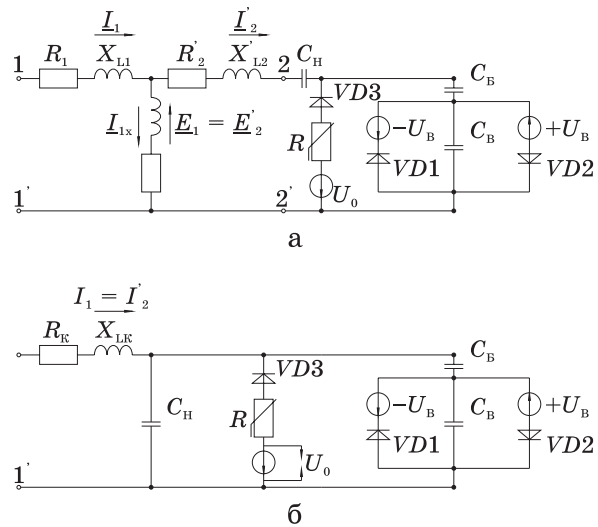


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения локального ионизатора-озонатора

В схеме замещения источник питания (повышающий трансформатор) можно представить через Т-образную схему (см. рис. 1а). Приведенный трансформатор математически описывается уравнениями электрического состояния:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= E_1 + R_1 I_1 + jX_{1L} I_1, \\ U_2' &= E_2' - R_2' I_2' - jX_{2L}' I_2', \end{aligned} \right\}$$

где $R_1; X_{1L}$ – активное сопротивление и сопротивление рассеяния первичной обмотки соответственно; $R_2'; X_{2L}'$ – приведенные активное сопротивление и сопротивление рассеяния вторичной обмотки соответственно.

Уравнение токов для данной схемы будет иметь следующий вид:

$$I_1 = I_{1x} + I_2',$$

где ток I_1 можно рассматривать как две составляющие: одна I_{1x} определяет основной магнитный поток Φ , I_2' компенсирует размагничивающее действие тока вторичной обмотки.

В активном сопротивлении ветви холостого хода R_0 при токе I_{1x} мощность потерь эквивалентна потерям в магнитопроводе (X_0 – эквивалентное реактивное сопротивление):

$$R_0 I_{1x}^2 = \Delta P_{ст.}$$

Падение напряжения на ветви холостого хода с комплексным сопротивлением $Z_0 = R_0 + jX_0$

при токе I_{1x} равно эдс E_1 и E

В схеме замещения источник питания представлен через упрощенную схему замещения, в которой можно пренебречь током холостого хода из-за его малости, а R_k и X_k считать сопротивлениями короткого замыкания, параметры которых определяются так (см. рис. 1б):

$$R_k = R_1 + R_2';$$

$$X_k = X_{1L} + X_{2L}'.$$

Ионизатор-озонатор локального типа как приемник электрической энергии обладает нелинейным активно-емкостным сопротивлением. При анализе стационарных процессов пренебрежем нелинейными свойствами ионизатора-озонатора, что позволит упростить расчеты и не снизит точности качественных закономерностей поведения системы.

В случае применения коронной и барьерной электродных систем ионизатор-озонатор можно представить в виде эквивалентных схем замещения, выбор которых определяется лишь удобством математического моделирования ионизатора-озонатора (см. рис. 1). Эти схемы справедливы при условии, что напряжение на разрядном промежутке во время разряда остается постоянным. Следовательно, напряжение в разрядном промежутке можно представить схемой замещения из двух эдс $\pm U_B$ или в виде двух диодов $VD1$ и $VD2$, которые в зависимости от полярности приложенного напряжения позволяют поддерживать на конденсаторе постоянное напряжение.

Диод $VD3$ выключает последовательно с разрядной камерой ионизатора, имеющего нелинейное сопротивление R и разрядную камеру V_0 , позволяет снизить импульсы в разрядной камере и получить на выходе стабильную концентрацию отрицательных ионов.

Источником питания является высоковольтный трансформатор, который

выполнен в виде схемы замещения, состоящей из индуктивности L_k и активного сопротивления R_k . При этом учитывается индуктивное и активное сопротивление дросселя, а также индуктивность и активное сопротивление короткого замыкания трансформатора.

Процессы в системе разделяются на отдельные интервалы времени (стадии), в течение которых состояние ни одного из элементов цепи не меняется, и физические процессы описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Рассмотрим характер изменения токов и напряжений в элементах схемы. Зададим начальные условия для двух стадий.

Стадия 1: в момент коммутации конденсатор до включения был незаряжен ($t = 0; I_k = 0; U_c = 0$).

Стадия 2: в момент отключения конденсатор заряжен ($t = 0; I_{уст.} = 0; U_{уст.} = E_m$).

Дифференциальное уравнение процессов для стадий 1 и 2 имеет следующий вид:

$$R_1 + L di/dt + u = U_m; \quad (1)$$

$$i = C du_c/dt. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$RC du_c/dt + LC d^2u_c/d^2t + u_c = U_m. \quad (3)$$

Уравнение (3) имеет решение:

$$u_c = u_{уст} + u_{св} = u_{уст} + k_1 \cdot e^{p_1 t} + k_2 \cdot e^{p_2 t}, \quad (4)$$

где $u_{уст}$ – установившееся напряжение на конденсаторе, представляющее частное решение неоднородного уравнения (3); $u_{св}$ – свободная составляющая напряжения на конденсаторе, представляющая общее решение однородного дифференциального уравнения; p_1, p_2 – корни характеристического уравнения.

Характеристическое уравнение для выражения (3):

$$LCP^2 + RCp + 1 = 0. \quad (5)$$

Корни характеристического уравнения (5) определяются так:

$$p_{1,2} = -R/2L \pm \sqrt{(R/2L)^2 - 1/LC}. \quad (6)$$

Характер процесса в течение цикла работы ионизатора-озонатора качественно зависит от того, по какому закону он протекает (в течение стадии 1 или стадии 2 – по периодическому (колебательному) или аperiodическому закону, т. е. от отношения $(R/2L)^2$ и $1/LC$).

Для стадии 1 (если до включения конденсатор был не заряжен) ток в катушке всегда был равен току зарядки

конденсатора:

$$i = C \, du/dt = k_1 p_1 C e^{p_1 t} + k_2 p_2 C e^{p_2 t}. \quad (7)$$

Подставим начальные условия в уравнения (4) и (6):

$$0 = k_1 + k_2 + E_0 \Rightarrow k_1 = E_0 p_2 / (p_1 - p_2);$$

$$0 = k_1 p_1 + k_2 p_2 \Rightarrow k_2 = -E_0 p_1 / (p_1 - p_2).$$

Тогда:

$$\left. \begin{aligned} u &= E_0 [1 + (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) / (p_1 - p_2)]; \\ i &= E_0 \left((p_1 p_2 C) / (p_1 - p_2) \right) (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Если корни p_1 и p_2 будут вещественными, то характер процесса работы системы будет изменяться по периодическому закону: $(R/2L)^2 > 1/LC$.

Если оба корня будут комплексными величинами, то – по аperiodическому закону:

$$(R/2L)^2 < 1/LC.$$

Тогда

$$p_1 = 1/\tau + j\omega_0; \quad p_2 = 1/\tau - j\omega_0, \quad (9)$$

$$\text{где } \tau = 2L/R; \quad \omega_0 = \sqrt{1/LC - (R/2L)^2}. \quad (10)$$

Подстановка выражений (9) в уравнение (8) позволяет получить формулы для расчета напряжения u и тока i :

$$\left. \begin{aligned} u &= E_0 [1 - e^{-t/\tau} (\cos \omega_0 t + (1/\tau \omega_0) \sin \omega_0 t)]; \\ i &= (E_0 / \omega_0 L) e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

В этом случае напряжение на конденсаторе при включении системы соответствует кривым 1 и 2 ($Y_1; Y_2$) (рис. 2). Причем, если активное сопротивление очень мало ($R \ll 2 \sqrt{L/C}$), то

$$\left. \begin{aligned} u &= E_0 [1 - e^{-t/\tau} \cos \omega_0 t]; \\ i &= E_0 \sqrt{L/C} e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

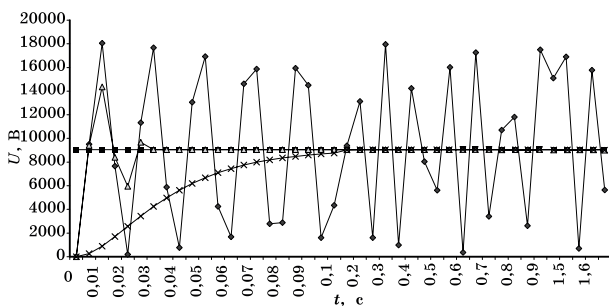


Рис. 2. Изменение напряжения на ионизаторе-озонаторе при различных режимах работы системы «источник питания – ионизатор-озонатор»: — Y ; - - Y_1 ; ··· Y_2 ; - · Y_3

При этом напряжение на конденсаторе достигает почти удвоенного значения

E_0 (кривая 2 на рис. 2). Максимальное значение тока $I_{\max} = E_0 \sqrt{C/L}$.

Граничное условие существования аperiodического процесса $(R/2L)^2 = 1/LC$, или $\omega_0 = 0$.

При этом, поскольку предел $(\sin \omega_0 t) / \omega_0 = t$, если $\omega_0 \rightarrow 0$, уравнение (12) преобразуется к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned} u &= E_0 (1 - e^{-t/\tau} - (t/\tau) e^{-t/\tau}); \\ i &= (2E_0 / R) t / \tau e^{-t/\tau}. \end{aligned} \right\}$$

Этот случай соответствует кривой 3 (Y_3) на рис. 2.

При отключении этой системы (стадия 2) большей частью получаются совершенно иные зависимости, чем при включении, т. е. после установления стационарного режима выключатель размыкается, а конденсатор остается заряженным и на нем сохраняется напряжение. Конденсатор либо будет разряжаться через сопротивление его изоляции, либо при размыкании выключателя возникнет переходный процесс, способствующий переходу к новому стационарному режиму.

При размыкании выключателя (в момент времени $t = 0$) $u = 0$; $i = I_0$, следовательно,

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= E_0 + k_1 + k_2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow k_1 = (E_0 p_2 + (1/C) I_0) / (p_1 - p_2); \\ I_0 &= k_1 C p_1 + k_2 C p_2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow k_2 = - (E_0 p_1 + (1/C) I_0) / (p_1 - p_2). \end{aligned} \right.$$

Если процесс колебательный, то $u = E_0 [1 - e^{-t/\tau} (\cos \omega_0 t + (1/\omega_0 \tau) \sin \omega_0 t)] + I_0 \sqrt{L/C} e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t$.

Если $R < 2 \sqrt{L/C}$, то

$$u = E_0 (1 - e^{-t/\tau} \cos \omega_0 t) + I_0 \sqrt{L/C} e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t; \quad (13)$$

$$i = E_0 \sqrt{L/C} e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t + I_0 e^{-t/\tau} \cos \omega_0 t. \quad (14)$$

Если $R \ll 2 \sqrt{L/C}$, то напряжение на конденсаторе может значительно превысить напряжение E_0 . В этом случае в уравнениях (13) и (14) вторые слагаемые значительно превышают первые, т. е. в цепи может возникнуть перенапряжение и система выйдет из строя (рис. 3а).

Для расчета максимального значения напряжения на конденсаторе можно воспользоваться следующей формулой:

$$U_{\max C} = I_0 \sqrt{L/C} = (E_0 / R) \sqrt{L/C},$$

так как энергия поля катушки $W = 0,5 I_0^2 L$ почти полностью воспринята конденсатором, т. е. $0,5 U_m^2 C = 0,5 I_0^2 L$.

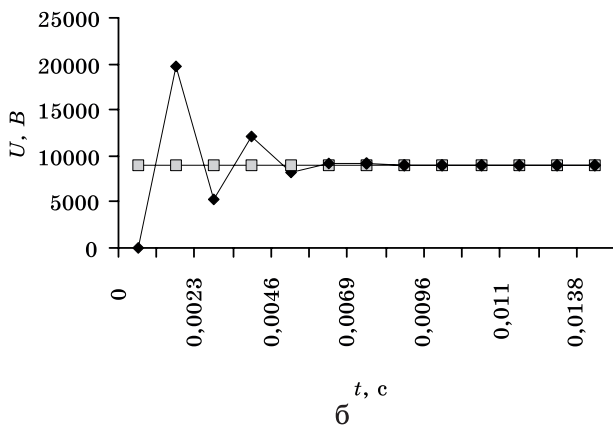
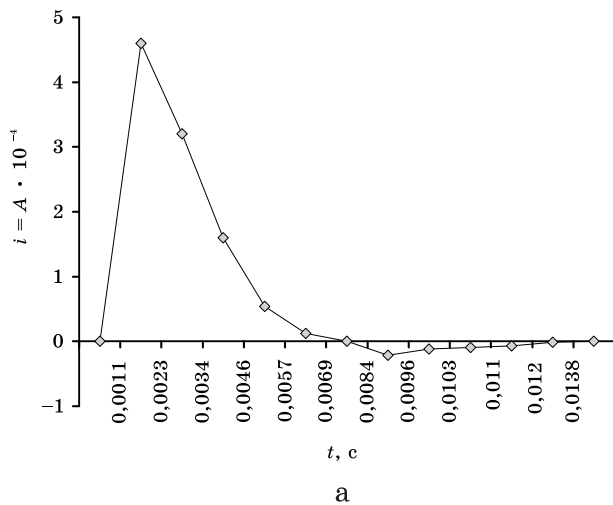


Рис. 3. Изменение напряжения и тока в момент отключения системы: \diamond — i , А; \blacklozenge — U , В; \square — E_0 , В

Из рис. 3б видно, что напряжение постепенно затухает до значения E_0 , в то же время ток приближается к нулю.

Переходные процессы в системе возникают либо при отключении системы (если используются контактные реле времени или другие устройства), либо при отключении короткого замыкания на конце линии передачи высокого напряжения (выход из строя одного или нескольких локальных ионизаторов-озонаторов или пробоя изоляции).

Полученные уравнения стационарных процессов в системе «источник питания – локальные ионизаторы-озонаторы воздуха» позволяют дать оценку режимам работы системы, объяснить процессы образования озона и ионов в разрядном промежутке, определить стабильную работу системы при ее эксплуатации в производственных условиях.

1. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.

2. Сторчевой В. Ф. Ионизация и озонирование воздушной среды. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2003. – 175 с.

Материал поступил в редакцию 20.03.12.
Сторчевой Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, первый проректор
 Тел. 8 (499) 976-20-18