

Моделирование электрических параметров газоразрядной лампы высокого давления

Предложена математическая модель электрических параметров газоразрядной лампы высокого давления с учетом нелинейной вольт-амперной характеристики и ее структурно-логическая схема. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований.

газоразрядная лампа, высокое давление, математическая модель, пускорегулирующий аппарат, вольт-амперная характеристика

Введение

Газоразрядные лампы высокого давления, далее лампы, широко используются для освещения промышленных объектов, аэродромов, автомагистралей. Это поясняется тем, что их срок службы достигает 20 тыс. ч., световая отдача до 130 лм/Вт. До настоящего времени электропитание ламп осуществляется от электромагнитных пускорегулирующих аппаратов (ЭМПРА), коэффициент мощности которых изменяется в пределах 0,4–0,8. Наряду с высокой надежностью и сравнительно небольшими затратами в процессе эксплуатации последним присущи следующие недостатки: не предусмотрена регулировка светового потока, что приводит к неоправданно высокому использованию электрической энергии; не обеспечивается номинальный электрический режим при колебаниях напряжения в сети, что приводит к сокращению срока службы лампы; сравнительно высокие массо-габаритные показатели ввиду использования устаревшей элементной базы.

Современные условия снижения энергоемкости и повышения эффективности использования энергоносителей требуют для питания ламп разрабатывать более совершенные электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА). Использование современной элементной базы позволяет исключить или существенно снизить недостатки, которые присущи ЭМПРА. Основными преимуществами ЭПРА являются: обеспечение электрических режимов лампы на частотах выше 20 кГц, что позволяет одновременно уменьшить массо-габаритные показатели источников питания, увеличить срок службы и световую отдачу лампы. Для разработки ЭПРА необходимо исследовать характерные особенности электродинамических процессов в лампе с учетом нелинейных зависимостей между отдельными параметрами, их влияние на режимы пускового устройства и надежность работы последних. Таким образом, актуальность разработки математической модели с учетом нелинейных взаимосвязей между параметрами лампы соответствует требованиям практики.

© Д. А. Кончуковский 2010 г.

Целью данной работы является:

- 1) разработка математической модели газоразрядной лампы с учетом нелинейных зависимостей между параметрами;
- 2) моделирование номинального установившегося электрического режима лампы.

Принципиальные основы моделирования параметров газоразрядных ламп следуют из анализа существующих литературных источников [1–6]. При разработке математических моделей электрических режимов ламп используются два методологических подхода.

Первый основан на предварительно установленных причинно-следственных взаимосвязях между параметрами [1–4]. В [1] используется PSpice-совместимая модель, которая базируется на уравнении теплопереноса в плазме

$$\frac{dQ}{dt} = P_{in} - P_{out}, \quad (1)$$

в сочетании с дифференциальным уравнением электрической проводимости лампы

$$R_{lamp} = \int_V \frac{1}{\sigma_{\Sigma}} \cdot \frac{L}{S} \cdot dV. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) приняты следующие обозначения: Q – теплосодержание системы; P_{in} – подводимая энергия; P_{out} – суммарная энергия тепловых потерь и излучения; σ_{Σ} – суммарная проводимость компонентов газовой смеси; L и S – длина и сечение разрядного промежутка, соответственно.

Использование данной математической модели к решению поставленной задачи неприемлемо по следующим причинам: отсутствует единая обобщенная зависимость между параметрами; используется ряд неопределенных взаимосвязей с эмпирическими коэффициентами; позволяет моделировать процессы в установившемся номинальном режиме. В [2] для моделирования проводимости лампы используется следую-

шее нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{k_1(g)} \cdot [u_D^2 - U_D^2(g)] \cdot g, \quad (3)$$

где $k_1(g) = \frac{dW}{dg}$ – коэффициент, учитывающий инерционные свойства разряда; g – проводимость лампы в установившемся режиме; u_D – напряжение на лампе.

Эти модели позволяют исследовать электрические режимы в схемах на низких и высоких частотах. При этом они не в полной мере отражают режим разгорания лампы.

В публикациях [3–4] для разработки модели используются уравнение для средней концентрации электронов, приведенной проводимости, а также уравнение статической характеристики лампы.

Второй подход основан на использовании регрессионных моделей газоразрядной лампы, в которых проводимость моделируется дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами [5–6].

Одним из основных недостатков рассмотренных моделей является: отсутствие обобщенной методики исследования динамических режимов на разных частотах; они не в полной мере отображают режим разгорания, что затрудняет оценивать надежность и текущее техническое состояние пускорегулирующего аппарата, а также срок службы лампы.

Математическая модель газоразрядной лампы базируется на уравнении закона сохранения энергии, использование которого корректно для описания процессов в разрядных лампах [8]. Моделируемый объект представляем в виде двухполюсника, включенного в электрическую цепь переменного тока. Взаимосвязь между параметрами лампы описывается дифференциальным уравнением, которое составлено на основе условия баланса энергии, поступающей от источника питания, и внутренней энергии объекта. Внутренняя энергия пропорциональна изменению температуры T , согласно следующему уравнению:

$$k_u \cdot \frac{dT}{dt} = P_{подв} - P_{ном}, \quad (4)$$

где k_u – коэффициент, учитывающий инерционные свойства разряда [Вт·с/К]; $P_{подв} = u_l \cdot i_l$ – подводимая мощность; $P_{ном}$ – мощность потерь (большая ее часть составляет мощность излучения разряда).

Для использования приведенных равенств полагаем, что мощность потерь $P_{ном}$ пропорциональна квадрату изменения температуры T [9]. С учетом этого уравнение (4) принимает следующий вид:

$$k_u \cdot \frac{dT}{dt} = u_l \cdot i_l - k_{охл} \cdot T^2, \quad (5)$$

где $k_{охл}$ – коэффициент аппроксимации зависимости мощности потерь от температуры.

Для нахождения температуры в текущий момент времени уравнение (5) представляем в интегральной форме

$$T = \frac{1}{k_u} \cdot \int (u_l \cdot i_l - k_{охл} \cdot T^2) \cdot dt + T(0), \quad (6)$$

где $T(0)$ – начальная температура объекта.

Представляя падение напряжения на лампе u_l через проводимость $g_l(T)$, согласно закону Ома $u_l = \frac{i_l}{g_l(T)}$, а также используя зависимость проводимости лампы от температуры T , получим следующее уравнение:

$$g_l(T) = k_g \cdot T^{k_T}, \quad (7)$$

где k_g, k_T – коэффициенты аппроксимации зависимости проводимости от температуры.

Для физического представления протекания процессов в лампе используем схему ее включения последовательно с индуктивным балластом, которая приведена на рис. 1.

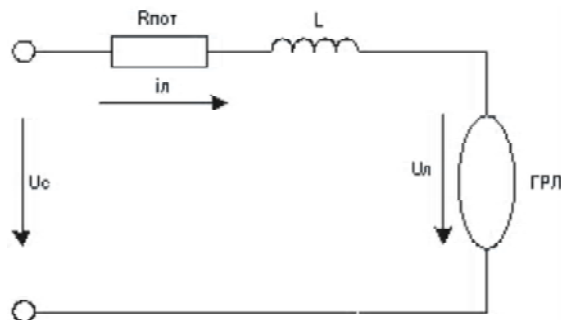


Рис. 1. Схема включения лампы с индуктивным балластом

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$R_{ном}$ – активное сопротивление обмоток дросселя; L – дроссель; ГРЛ – газоразрядная лампа.

Использование данной схемы позволяет установить взаимосвязь электрических параметров лампы и схемы включения. Согласно второму закону Кирхгофа:

$$u_c = u_{R_{ном}} + u_L + u_l, \quad (8)$$

где $u_{R_{ном}} = i_l \cdot R_{ном}$ – падение напряжения на активном сопротивлении обмоток дросселя; $u_L = L \cdot \frac{di_l}{dt}$ – падение напряжения непосредственно на дросселе.

На основании (8) выражение для нахождения тока представляем в интегральной форме

$$i_l = \frac{1}{L} \cdot \int (u_c - i_l \cdot R_{ном} - u_l) + i_l(0), \quad (9)$$

где $i_l(0)$ – начальное значение тока лампы.

Блок-схема математической модели отображает взаимосвязи между параметрами в уравнениях (1)–(9) и представлена на рис. 2. Блок-схема содержит модель индуктивного балласта и модель газоразрядной лам-

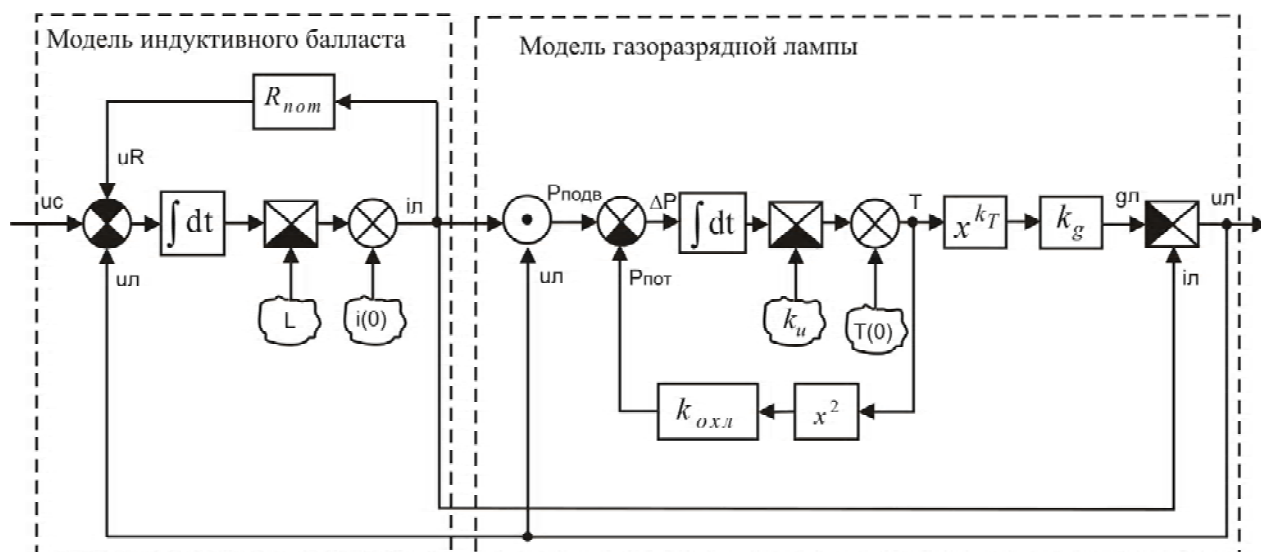


Рис. 2. Структурно-логическая блок-схема математической модели лампы в установившемся режиме

пы. Ток индуктивного балласта рассчитывается в соответствии с уравнением (9) и является входным параметром модели лампы. Значение индуктивности L рассчитывается по ВАХ дросселя. Параметр $i(0)$ устанавливает начальное значение тока лампы. Сопротивление $R_{ном}$ приближенно учитывает активные потери в дросселе. Выходным параметром модели лампы является проводимость g_n , исходя из которой рассчитывается напряжение на лампе u_n . Параметр $T(0)$ устанавливает начальное значение температуры лампы. Коэффициенты, используемые в модели, принимали следующие значения $k_g = 0,0472$, $k_T = 1,979$, $k_u = 1,073 \left[\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{К}} \right]$, $k_{охл} = 1004$.

Отличительной особенностью блок-схемы является наглядность протекания физических процессов в математической модели лампы.

Экспериментальные исследования проводились для схемы включения лампы ДРЛ 400 с индуктивным балластом (рис. 1). Измерения тока и мощности лампы осуществлялись комплектом К505, осциллограммы $u_n(t)$ и $i_n(t)$ фиксировались электронным осциллографом RIGOL 562M.

Результаты исследования и их анализ. При моделировании принимались следующие параметры: $U_c = 220 \text{ В}$, $f_{сетев} = 50 \text{ Гц}$, $R_{ном} = 5 \text{ Ом}$, $L = 0,175 \text{ Гн}$, $i(0) = 0,01 \text{ А}$, $T(0) = 300 \text{ К}$.

На рис. 3, а показаны смоделированные зависимости напряжения u_n и тока i_n лампы от времени, на рис. 3, б показаны осциллограммы $u_n(t)$ $i_n(t)$, полученные экспериментально при питании лампы током промышленной частоты.

Из рис. 3 видно, что на частоте 50 Гц форма напряжения $u_n(t)$ близка к трапецеидальной. Стабилизация тока лампы осуществляется индуктивным балластом. Использование индуктивного ПРА позволяет реализо-

вать режим без пауз тока (напряжение сети всегда больше напряжения перезажигания). Низкая инерционность процессов возникновения и исчезновения носителей $u_n(\text{В}); i_n/30(\text{А})$

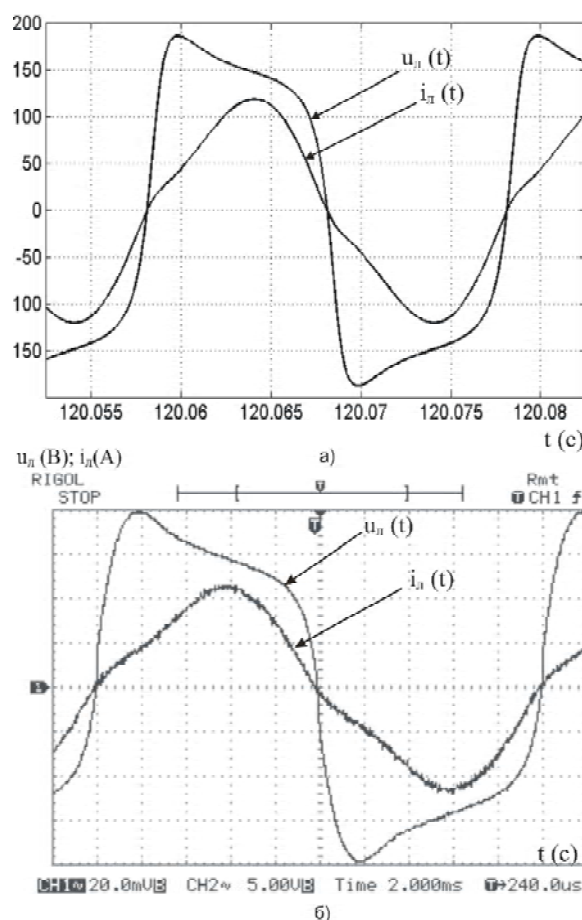


Рис. 3. Смоделированные зависимости напряжения u_n , тока i_n от времени: а) результаты экспериментальных исследований; б) для частоты 50 Гц (масштаб $i_n(t) - 2 \text{ А/дел}$, $u_n(t) - 50 \text{ В/дел}$)

зарядов приводит к тому, что при прохождении переменного тока промышленной частоты через газ отсутствует сдвиг фаз между током и напряжением на лампе. Дважды в течение периода происходит перезажигание лампы при прохождении тока через ноль.

На рис. 4, а показана динамическая вольт-амперная характеристика лампы, которая отражает зависимость изменения напряжения на лампе при изменении тока в электрической цепи – $u_a = f(i_a)$. На рис. 4, б показана ВАХ лампы ДРЛ 400, полученная экспериментально.

Анализ адекватности модели лампы при повышении частоты питающего напряжения

Исследовалась зависимость параметров модели от изменения частоты питающего напряжения. Как известно [7], при питании лампы током повышенной частоты в кривой напряжения $u_a(t)$ отсутствует перезажигание лампы каждые полпериода. Это поясняется тем, что при уменьшении мгновенного значения тока снижается скорость рекомбинации носителей заряда и плазма не успевает деионизироваться к моменту перезажигания. Форма напряжения на лампе практически синусоидальная. Т. к. концентрация носителей заряда, которая определяет проводимость, не успевает измениться в течение полупериода, пульсации проводимости лампы уменьшаются, текущее значение проводимости приближается к своему среднему. При повышении ча-

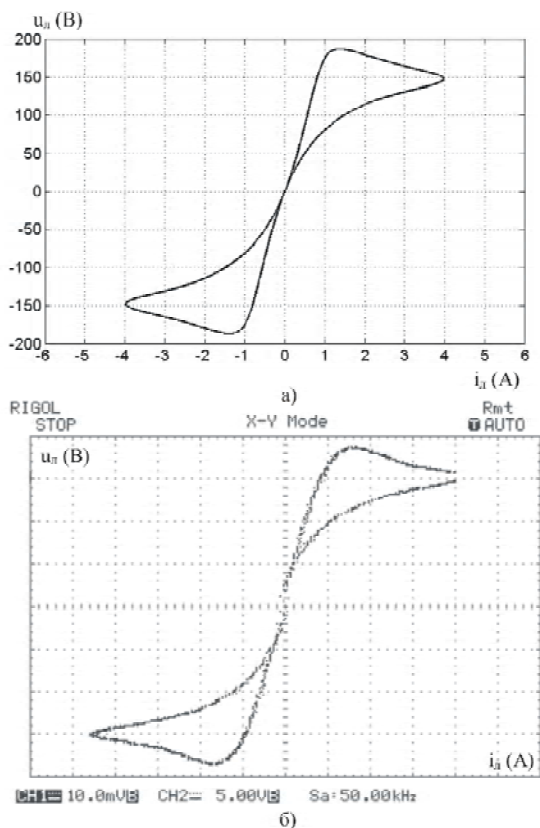


Рис. 4. Смоделированные зависимости напряжения u_a от тока i_a : а) результаты экспериментальных исследований; б) для частоты 50 Гц (масштаб по x – 1 А/дел, по y – 50 В/дел)

стоты питающего напряжения пульсации проводимости лампы при моделировании уменьшаются с 0,022 См до 0,002 См.

Источник питания высокой частоты представлялся как генератор сигналов с регулируемой амплитудой, частотой и формой сигнала.

На рис. 5 показаны временные диаграммы $u_a(t)$, $i_a(t)$ при питании лампы от источника прямоугольного напряжения частоты 15 кГц.

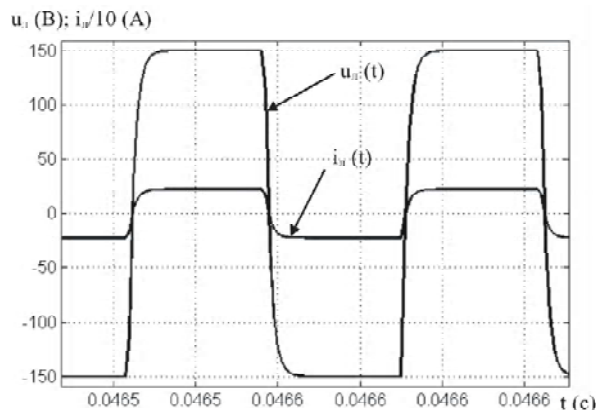


Рис. 5. Смоделированные зависимости напряжения u_a , тока i_a от времени при питании от источника прямоугольного напряжения частоты 15 кГц

ВАХ газоразрядных ламп при питании высокочастотным током существенно отличаются от таковых при питании током промышленной частоты. На высокой частоте газоразрядная лампа представляет собой омическое сопротивление, ее ВАХ преобразуются в прямую линию. Исследование адекватности модели подтвердило известный факт, что на повышенной частоте действующее значение напряжения на разряде несколько ниже, чем при питании на частоте сети. Это явление объясняется тем, что при приближении формы напряжения к синусоидальной увеличивается коэффициент мощности лампы и, соответственно, уменьшается действующее значение напряжения. На рис. 6 показаны временные диаграммы $u_a(t)$, $i_a(t)$, ВАХ модели лампы при изменении частоты питающего напряжения в диапазоне от 500 Гц до 10 кГц.

Выводы

1. Предложена математическая модель электрических параметров газоразрядной лампы и ее структурно-логическая схема, которая позволяет моделировать нагрузочные режимы в диапазоне частот 50 Гц–40 кГц с учетом нелинейной вольт-амперной характеристики. Погрешность между смоделированными и экспериментальными данными не превышает 5 %.
2. Разработанная математическая модель может использоваться в качестве нагрузки для исследования режимов электронных пускорегулирующих аппаратов с целью выбора их оптимальных параметров.
3. С целью расширения области использования предложенной математической модели для решения инже-

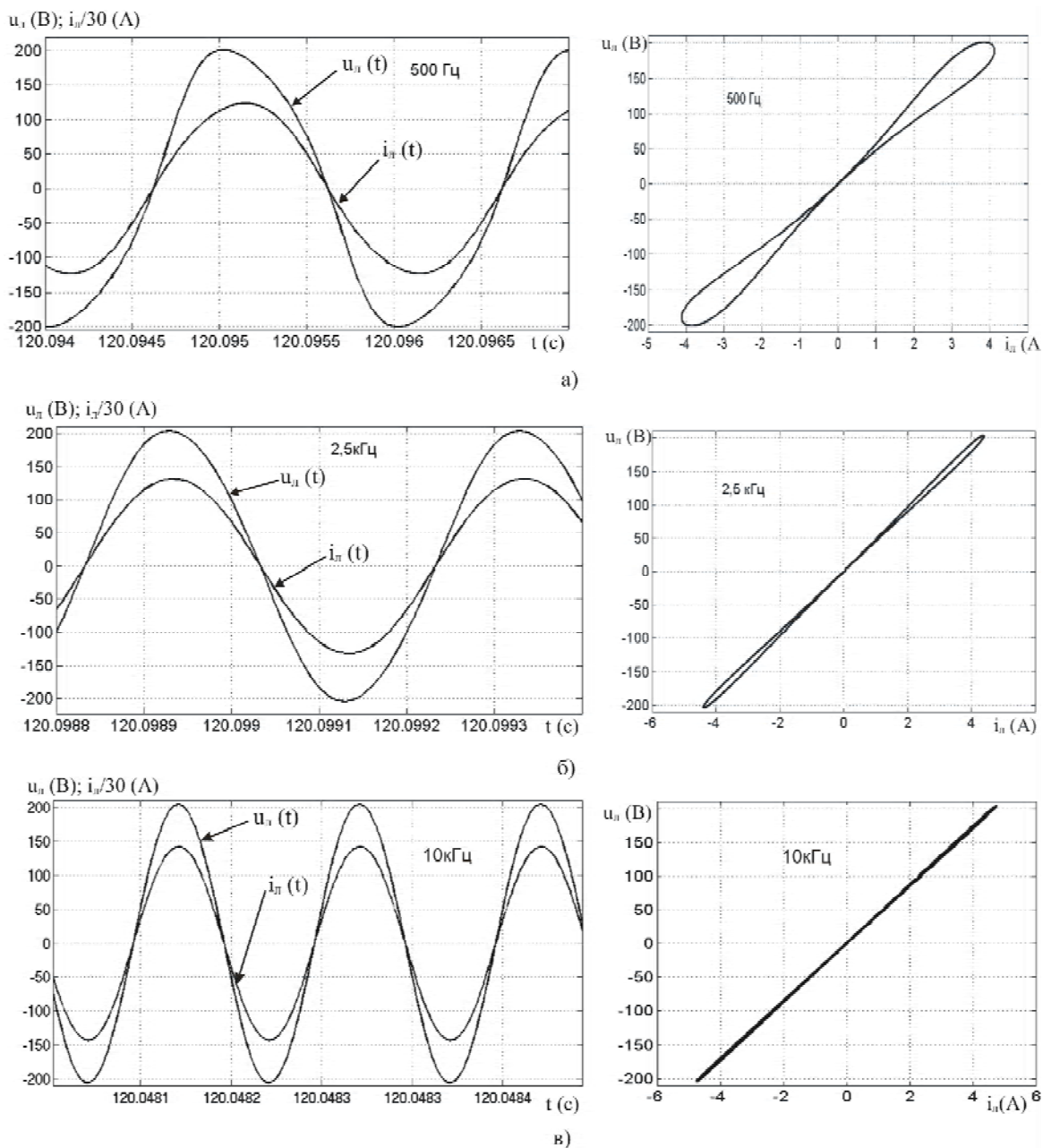


Рис. 6. Смоделированные зависимости напряжения u_n , тока i_n от времени для частот 500 Гц, 2,5 Гц, 10 кГц. Смоделированные зависимости напряжения u_n от тока i_n для частот 500 Гц, 2,5 Гц, 10 кГц

нерных задач целесообразно продолжить исследования в направлении учета переходных процессов в режимах разгорания лампы.

Список литературы

1. M. Shvartsas. A SPICE Compatible Model of High Intensity Discharge Lamps / M. Shvartsas, S. Ben-Yaakov // 30th IEEE power electronic specialists conference. – Vol. 2. – № 1. – 1999. – P. 1037–1042.
 2. Поляков В. Д. Схемотехническое моделирование нелинейных резистивных инерционных нагрузок / Поляков В. Д. // Вестник МЭИ. – 2005. – № 2. – С. 93–101.

3. Клыков М. Е. Расчеты электрических цепей с разрядными лампами / Клыков М. Е., Краснополяский А. Е., Соколов В. Б. // Светотехника. – 2002. – №2. – С. 2–4.
 4. Клыков М. Е. Моделирование электрических цепей с натриевыми лампами высокого давления / Клыков М. Е., Корягин О. Г., Краснополяский А. Е. // Светотехника. – 2003. – № 4. – С. 2–6.
 5. J. Koprnicky. Electric Conductivity Model of Discharge Lamps / J. Koprnicky. Selfreport of the Ph. D. Thesis. – Liberec. – 2007. – 44 p.
 6. P. R. Herrick. Mathematical models for High Intensity Discharge lamps / P. R. Herrick // IEEE Transaction on

power electronics. – 1980. – Vol. 16. – № 5. – P. 648–654.
 7. Краснопольский А. Е. Пускорегулирующие аппараты для разрядных ламп / А. Е. Краснопольский, В. Б. Соколов, А. М. Троицкий – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 207 с.
 8. Поляков В. Д. Моделирование электрической проводимости натриевой лампы высокого давле-

ния / Поляков В. Д., Обжерин Е. А. // Вестник МЭИ. – 2003. – № 4. – С. 86–91.
 9. Литвинов В. С. Разрядные источники оптического излучения (расчет и оптимизация параметров) / Литвинов В. С. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 156 с.

Поступила в редакцию 18.12.09 г.

Кончуковський Д. А. Моделювання електричних параметрів газорозрядної лампи високого тиску. Запропоновано модель електричних параметрів газорозрядної лампи високого тиску з урахуванням нелінійної вольт-амперної характеристики та її структурно-логічну схему. Наведено результати моделювання та експериментальні дослідження.
 газорозрядна лампа, високий тиск, математична модель, пускорегулювальний апарат, вольт-амперна характеристика

Konchukovskiy D. Modeling of High-Pressure Discharge Lamp electrical ratings.
A mathematic model of a high pressure gas discharge lamp for use in electronic ballast is presented. The model is based on the power balance equation and takes into account hysteresis appearance in V-I characteristic.
 high pressure gas discharge lamp, mathematic model, steady-state, ballast, V-I characteristic

УДК 621.359.537.3

В. В. Куц канд. техн. наук¹, **Д. В. Журавлев**²,
А. И. Назаров канд. техн. наук³, **М. А. Федотенко**¹

¹Запорожский национальный технический университет

²Запорожский трансформаторный завод

³НИИ электроэнергетики

Комбинированное фильтрокомпенсирующее устройство

Предлагается схема комбинированного фильтрокомпенсирующего устройства. Основные достоинства фильтра заключаются в автоматическом изменении параметров компенсации высших гармоник с минимальными потерями электрической энергии при передаче реактивной мощности, а также в поддержании электрического напряжения в сети электропитания на определенном уровне.

фильтрокомпенсирующее устройство, высшие гармоники, потери электрической энергии, электрическое напряжение, реактивная мощность

Обеспечение надежной эксплуатации электрического оборудования распределительных сетей 6–10 кВ промышленных предприятий, питающих дуговые и рудотермические печи, тиристорные приводы в прокатном производстве металлургических заводов, однофазные тяговые нагрузки и другие резкопеременные электроприемники больших мощностей является актуальной проблемой. В указанных электрических сетях возникают резкопеременные потоки реактивной мощности; процессы генерации в сеть высших гармоник, прежде всего пятой, седьмой и одиннадцатой стандартных гармоник напряжения. Кроме того, возникают несимметричные токи и напряжения, что приводит к ухудшению параметров качества электрической энергии, а также к повышению электрических потерь и величины

внутренних напряжений [1]. Необходимость повышения качества питающего напряжения поставила перед авторами задачу разработать новую схему фильтрокомпенсирующего устройства, которое позволяло бы при передаче реактивной мощности автоматически осуществлять компенсацию указанных гармоник при минимальных потерях электрической энергии в сети.

Существуют стандартные схемы подстанций промышленных производств, питающих вентиляцию нагрузку с параллельно установленными на питающих шинах силовыми фильтрами только пятой гармоники напряжения [2]. Основными недостатками указанных схем при питании дуговых и рудотермических печей является невозможность необходимой выборочной компенсации технологично возникающих максималь-

© В. В. Куц, Д. В. Журавлев, А. И. Назаров, М. А. Федотенко 2010 р.