

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

**К. В. ХАЦЕВСКИЙ
В. Е. БЕЛЯКОВ**

Омский государственный
технический университет

Омский институт
водного транспорта

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ДРОССЕЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ

В статье рассмотрен асинхронный электропривод с индуктивным реостатом (дресселем) в роторной цепи. Предложены схемы регуляторов скорости, улучшающие динамические характеристики электропривода. Получена имитационная модель регулируемого электропривода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, импульсное управление, регулятор скорости, математическая модель.

В настоящее время значительное внимание уделяется проблемам создания и повышения эффективности систем автоматизации проектирования (САПР). Проектирование сложных динамических систем, таких как устройство управления электроприводом грузоподъемного крана, с большим количеством параметров, влияющих на рабочий процесс, невозможно осуществлять без использования современных компьютерных методов. Применение САПР позволит сократить сроки создания и ввода в эксплуатацию образцов новой и модернизации существующей

технической техники, существенно снизить затраты на стадии разработки изделия.

В крановых механизмах преобладают электроприводы с асинхронными двигателями с фазным ротором. Для таких приводов широко используется дроссельное регулирование скорости вращения. Несмотря на потери энергии скольжения, интерес к этим решениям не снижается.

Рассчитаем характеристики асинхронного электропривода с дросселем $L_1 \dots L_3$ и регулятором скорости в роторной цепи [1], схема которого приведена

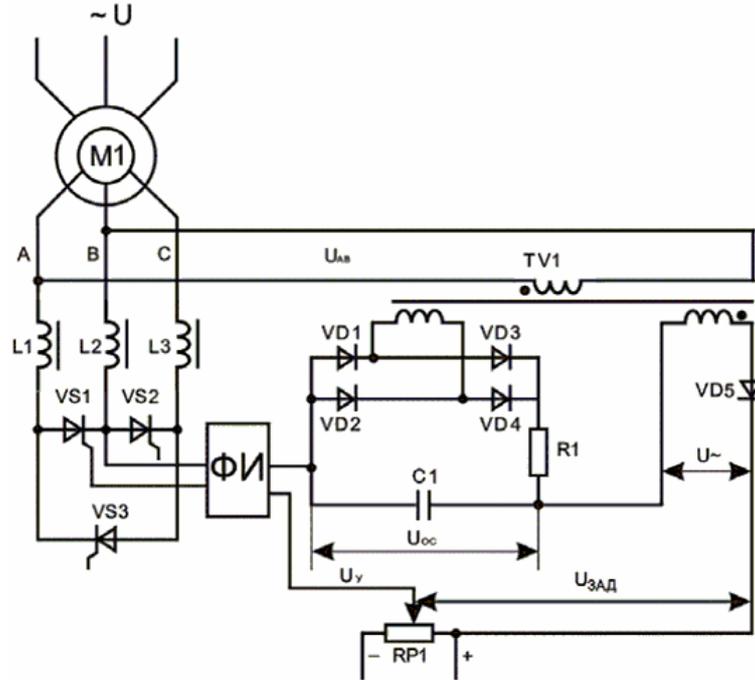


Рис. 1. Схема дроссельного регулятора электропривода

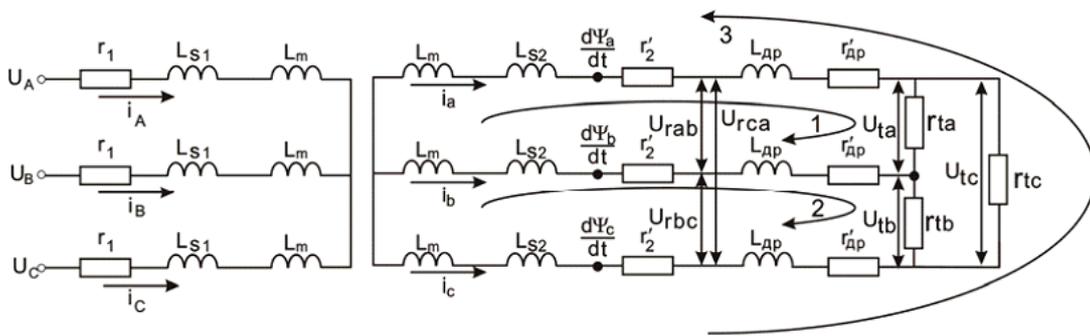


Рис. 2. Схема замещения дроссельного регулятора

на рис. 1 (на схеме показано управление тиристором VS_1 , управление остальными тиристорами аналогичное). При расчетах приняты следующие допущения:

— машина имеет гладкий воздушный зазор, все параметры ее линейны, а напряжения на выводах синусоидальны;

— каждый тиристор в фазах роторной цепи заменен на резистор сопротивлением R_r . Это сопротивление, в зависимости от того, открыт тиристор или закрыт, принимает следующие значения: $R_r = 0,001$ Ом (тиристор открыт); $R_r = 100$ кОм (тиристор закрыт).

Схема замещения дроссельного электропривода с учетом допущений представлена на рис. 2. Для схемы замещения система уравнений для статора и ротора имеет вид [2]:

$$\frac{d\Psi_A}{dt} = U_A - i_A \cdot r_1;$$

$$\frac{d\Psi_B}{dt} = U_B - i_B \cdot r_1;$$

$$\frac{d\Psi_C}{dt} = U_C - i_C \cdot r_1;$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} &= i_a(r'_2 + r'_{gp}) + L_{gp} \cdot \frac{di_a}{dt} + \\ &+ i_{ta} \cdot r_{ta} - i_b \cdot (r'_2 + r'_{gp}) - L_{gp} \cdot \frac{di_b}{dt} - i_{tc} \cdot r_{ta} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_b}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} &= i_b(r'_2 + r'_{gp}) + L_{gp} \cdot \frac{di_b}{dt} + \\ &+ i_{tb} \cdot r_{tb} - i_c \cdot (r'_2 + r'_{gp}) - L_{gp} \cdot \frac{di_c}{dt} - i_{ta} \cdot r_{tb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_c}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} &= i_c(r'_2 + r'_{gp}) + L_{gp} \cdot \frac{di_c}{dt} + \\ &+ i_{tc} \cdot r_{tc} - i_a \cdot (r'_2 + r'_{gp}) - L_{gp} \cdot \frac{di_a}{dt} - i_{tb} \cdot r_{tc} \end{aligned}$$

где U_a, U_b, U_c — мгновенные значения напряжений фаз статора;

$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c, \Psi'_a, \Psi'_b, \Psi'_c$ — мгновенные значения потокосцеплений фаз статора и ротора соответственно;

$r_1 = r_a = r_b = r_c$ — активное сопротивление фаз обмотки статора;

$r'_2 = r'_a = r'_b = r'_c$ — активное сопротивление фаз обмотки ротора;

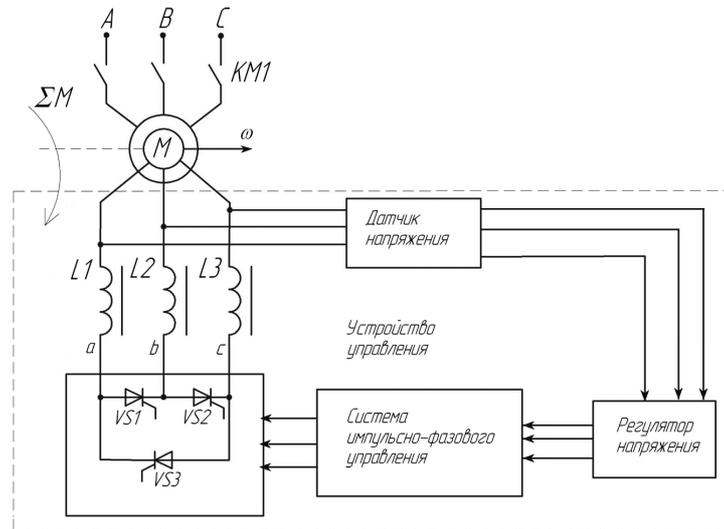


Рис. 3. Структурная схема дроссельного электропривода

$r'_{gp} = r_{gp} \cdot k_e^2$ — приведенное активное сопротивление дросселя;

L_{gp} — приведенная индуктивность обмотки дросселя.

Решение системы дифференциальных уравнений (1):

$$\begin{aligned} \Psi_A &= i_A \cdot L_1 + i_B \cdot N_{AB} + i_C \cdot N_{AC} + \\ &+ i_a \cdot N_{Aa} + i_b \cdot N_{Ab} + i_c \cdot N_{Ac}; \\ \Psi_B &= i_A \cdot N_{BA} + i_B \cdot L_1 + i_C \cdot N_{BC} + \\ &+ i_a \cdot N_{Ba} + i_b \cdot N_{Bb} + i_c \cdot N_{Bc}; \\ \Psi_C &= i_A \cdot N_{CA} + i_B \cdot N_{CB} + i_C \cdot L_1 + \\ &+ i_a \cdot N_{Ca} + i_b \cdot N_{Cb} + i_c \cdot N_{Cc}; \\ \Psi_a - \Psi_b &= i_A \cdot (N_{aA} - N_{bA}) + \\ &+ i_B \cdot (N_{aB} - N_{bB}) + i_C \cdot (N_{aC} - N_{bC}) + \\ &+ i_a \cdot (L_2 - N_{ba}) + i_b \cdot (N_{ab} - L_2) + i_c \cdot (N_{ac} - N_{bc}); \quad (2) \\ \Psi_b - \Psi_c &= i_A \cdot (N_{bA} - N_{cA}) + \\ &+ i_B \cdot (N_{bB} - N_{cB}) + i_C \cdot (N_{bC} - N_{cC}) + \\ &+ i_a \cdot (N_{ba} - N_{ca}) + i_b \cdot (L_2 - N_{cb}) + i_c \cdot (N_{bc} - L_2); \\ \Psi_c - \Psi_a &= i_A \cdot (N_{cA} - N_{aA}) + \\ &+ i_B \cdot (N_{cB} - N_{aB}) + i_C \cdot (N_{cC} - N_{aC}) + \\ &+ i_a \cdot (N_{ca} - L_2) + i_b \cdot (N_{cb} - N_{ab}) + i_c \cdot (L_2 - N_{ac}); \end{aligned}$$

где $N_{AB} = N_{AC} = N_{BA} = N_{BC} = N_{CA} = N_{CB} = N_1$ — взаимные индуктивности между любыми двумя обмотками статора;

$N_{ab} = N_{ac} = N_{ba} = N_{bc} = N_{ca} = N_{cb} = N_2$ — взаимные индуктивности между любыми двумя обмотками ротора;

$N_{Aa'} = N_{Ab'} = N_{Ac'} = N_{Ba'} = N_{Bb'} = N_{Bc'} = N_{Ca'} = N_{Cb'} = N_{Cc'}$ — взаимные индуктивности между соответствующими фазами статора и ротора;

$N_{aA'} = N_{aB'} = N_{aC'} = N_{bA'} = N_{bB'} = N_{bC'} = N_{cA'} = N_{cB'} = N_{cC'}$ — взаимные индуктивности между соответствующими фазами ротора и статора;

L_1, L_2 — индуктивности обмоток статора и ротора соответственно.

Токи, протекающие через тиристор, определяем по законам Кирхгофа:

$$i_{tra} = i_a + i_{trc};$$

$$i_{trb} = i_b + i_{tra}; \quad (3)$$

$$i_{tra} \cdot r_{ta} + i_{trb} \cdot r_{tb} + i_{trc} \cdot r_{tc} = 0.$$

Решая системы уравнений (2) и (3), определяем токи $i_{A'}$, $i_{B'}$, $i_{C'}$, $i_{a'}$, $i_{b'}$, $i_{c'}$ и токи, протекающие через тиристоры i_{tra} , i_{trb} , i_{trc} .

Мгновенные значения напряжения на кольцах каждой фазы ротора:

$$\begin{aligned} U_{rab} &= \frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} - i_a \cdot r'_2 + i_b \cdot r'_2; \\ U_{trb} &= \frac{d\Psi_b}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} - i_b \cdot r'_2 + i_c \cdot r'_2; \quad (4) \\ U_{trc} &= \frac{d\Psi_c}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} - i_c \cdot r'_2 + i_a \cdot r'_2. \end{aligned}$$

Напряжения управления каждым тиристором:

$$\begin{aligned} U_{Ya} &= k_{pot} \cdot U_{oc} + \frac{U_{rab}}{k_{tr2}} - U_{zag}; \\ U_{Yb} &= k_{pot} \cdot U_{oc} + \frac{U_{trb}}{k_{tr2}} - U_{zag}; \quad (5) \\ U_{Yc} &= k_{pot} \cdot U_{oc} + \frac{U_{trc}}{k_{tr2}} - U_{zag}, \end{aligned}$$

где k_{tr2} — коэффициент трансформации понижающего трансформатора TV1 цепи управления тиристорами; k_{pot} — коэффициент потенциометра задания; U_{oc} — напряжение обратной связи; U_{zag} — напряжение задания.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя определяется по формуле:

$$M_s = \frac{(i_A(\Psi_c - \Psi_b) + i_B(\Psi_a - \Psi_c) + i_C(\Psi_b - \Psi_a)) \cdot 2p}{3\sqrt{3}}. \quad (6)$$

Тогда сумма моментов определяется:

$$\sum M = M_{гидр} + M_s. \quad (7)$$

Электропривод (рис. 3) состоит из асинхронного двигателя с фазным ротором, дросселей $L1 \dots L3$,

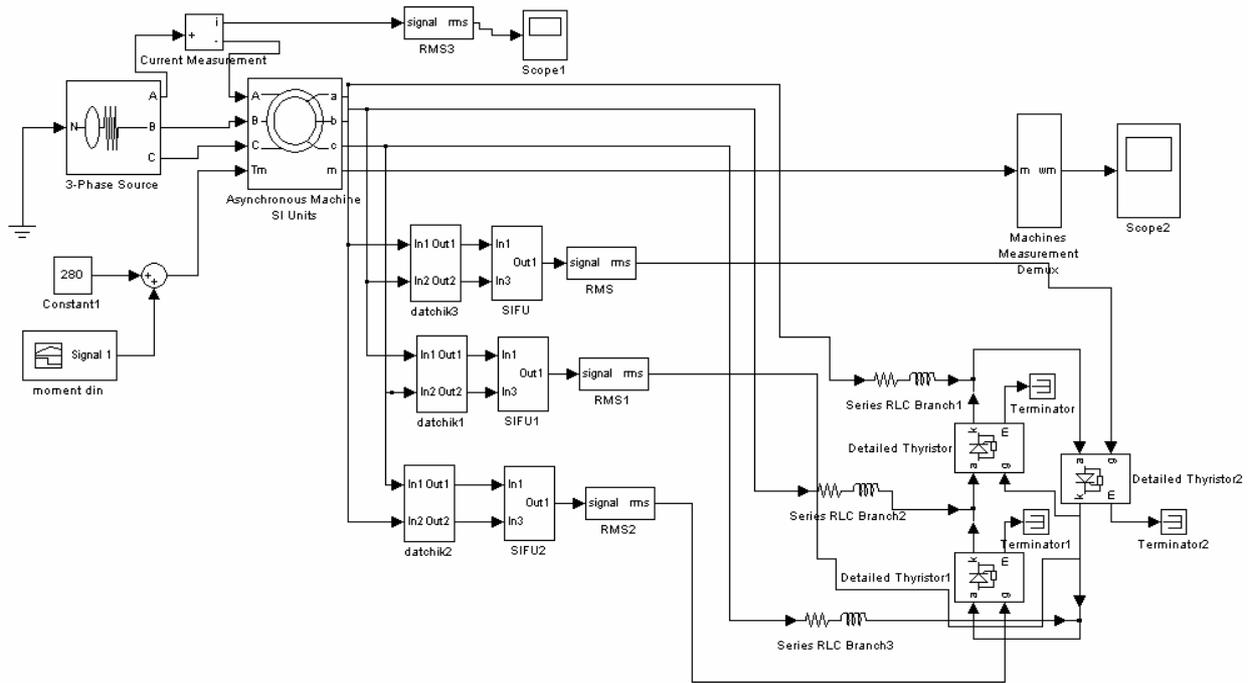
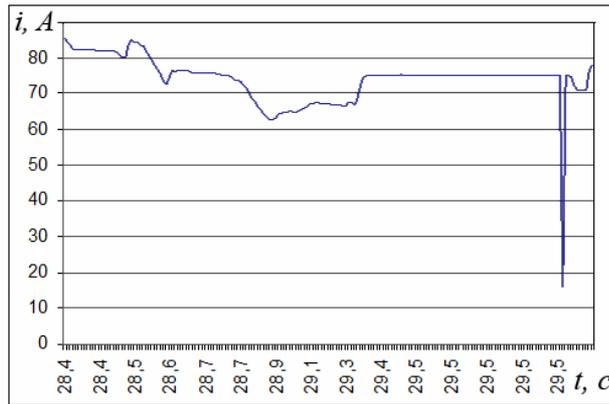
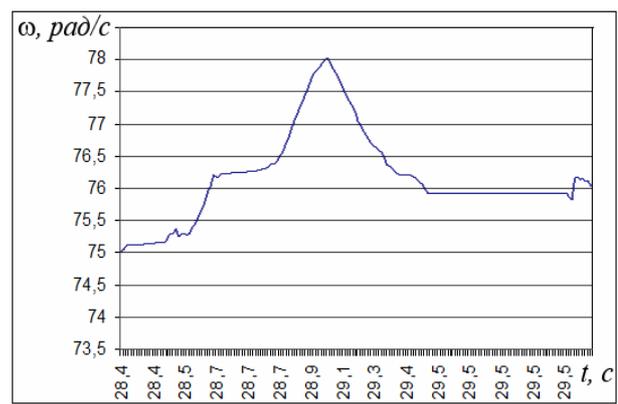


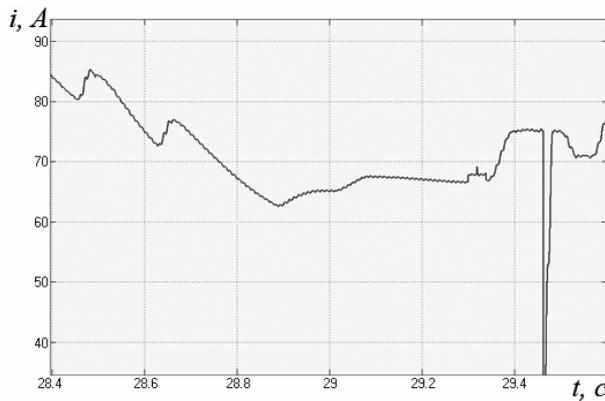
Рис. 4. Имитационная модель дроссельного электропривода в среде Matlab



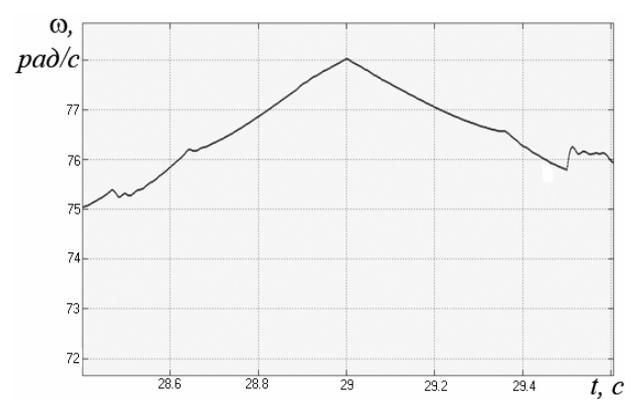
а



б



в



г

Рис. 5. Результаты экспериментальных и теоретических исследований:
 а) экспериментальные данные $i=f(t)$; б) теоретические исследования $i=f(t)$;
 в) экспериментальные данные $\omega=f(t)$; г) теоретические исследования $\omega=f(t)$

тиристоры $VS1 \dots VS3$ в роторной цепи, соединенных по схеме треугольника и системы управления тиристорами [3]. В свою очередь система управления содержит блоки обратной связи по напряжению на роторе, блок определяющий продолжительность полуволны напряжения на кольцах ротора, блок формирования управляющих импульсов, источник питания и блок задания напряжения.

Особенностью рассматриваемого регулятора является введение дополнительного напряжения, задающего жесткость механической характеристики при появлении дополнительного момента. Данный способ управления включает в себя определение продолжительности полупериода напряжения на кольцах ротора и расчет угла управления α каждого тиристора. Данный принцип управления обеспечивает линейное регулирование угла управления тиристора в диапазоне от 0 до 180° при изменении нагрузки на валу электродвигателя, существенно повышая жесткость механической характеристики.

При $U_{oc} < U_3$ угол управления α устанавливается равным 180° , чему соответствует полностью закрытое состояние тиристоров.

При $U_{oc} > (U_3 + \Delta U_{gon})$ угол управления α устанавливается равным 0° , при этом тиристоры полностью открыты. В остальных случаях угол α рассчитывается по формуле (8)

$$\alpha = \frac{U_3 + \Delta U_{gon} - U_{oc}}{\Delta U_{gon}} \cdot 180. \quad (8)$$

Использование современных средств моделирования позволяет повысить эффективность подобного анализа, так как процесс формирования уравнений, описывающих электромагнитные процессы в системах силовой электроники, формализован, и соответствующие алгоритмы в совокупности с численными методами интегрирования и сервисными функциями реализованы в виде стандартных сред моделирования [4]. В имитационной модели в программе Matlab (рис. 4) реализована обратная связь по напряжению на кольцах ротора [5]. На рис. 5 представлены результаты сравнения теоретического и экспериментального изменения тока статора и скорости двигателя. При наложении на экспериментальные переходные процессы кривых теоретических переходных процессов качественных расхождений не наблю-

далось [6]. Расхождение установившихся значений выходных характеристик не превышает 2 %, что приемлемо для решения задач, поставленных в данной работе.

Библиографический список

1. Тиристорный регулятор скорости дроссельного асинхронного электропривода с регулируемой жесткостью механической характеристики / А. М. Борисов [и др.] // Электромеханика. Известия вузов. — 2008. — № 2. — С. 56–60.
2. Шишков, А. Н. Асинхронный электропривод крановых механизмов с дроссельным регулированием скорости : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Шишков. — Челябинск : ЮУрГУ, 2007. — 19 с.
3. Беляков, В. Е. Система автоматизированного моделирования устройств управления электроприводами самоходных грузоподъемных кранов / В. Е. Беляков // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. — Омск, 2014. — С. 46–49.
4. Хацевский, К. В. Модель асинхронного электродвигателя для измерения механических координат / К. В. Хацевский, Ю. Н. Дементьев, А. Д. Умурзакова // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 3 (123). — С. 200–204.
5. Беляков, В. Е. Исследования системы управления грузоподъемного крана ДЭК-251 в программе MATLAB / В. Е. Беляков // Сб. науч. тр. ОИВТ. — Омск, 2013. — № 11. — С. 6–14.
6. Беляков, В. Е. Динамическая система грузоподъемного крана ДЭК-251 / В. Е. Беляков // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. — 2012. — Вып. 1 (23). — С. 7–12.

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета.

БЕЛЯКОВ Виталий Евгеньевич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта. Адрес для переписки: xkv-post@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 15.03.2016 г.

© К. В. Хацевский, В. Е. Беляков

Книжная полка

Клименко, К. А. Исследование электромагнитного поля трансформаторов промышленной частоты с короткозамкнутыми витками : моногр. / К. А. Клименко. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 137 с.

Приведены результаты исследований электромагнитного поля трансформаторов промышленной частоты с короткозамкнутыми витками, показана возможность использования трансформатора с короткозамкнутым кольцом в качестве датчика тока с разомкнутой сигнальной обмоткой, установлена возможность обнаружения наличия короткозамкнутых витков в силовых трансформаторах с использованием датчиков Холла, разработана методика расчета конструктивных параметров трансформаторного датчика тока с короткозамкнутым кольцом, позволяющая проектировать датчики для различных систем автоматики. Предназначена для специалистов в области электроэнергетики, а также для широкого круга научных работников, аспирантов и студентов вузов, обучающихся по энергетическим специальностям.

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ И ВНЕДРЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ГАЗООЧИСТКИ

Рассмотрены принципы и особенности работы электрофильтров, проблемы и причины их некачественной работы на омской ТЭЦ-5. Описаны рекомендации по оптимизации режимов работы электрофильтров.

Ключевые слова: электрофильтр, электрод, ТЭЦ, электрическое поле, коронный разряд, ионизация.

9 февраля 2014 года в городе Омске выпал черный снег. Это произошло в Омске не впервые. В 2012 году было зафиксировано два случая выпадения черного снега. Тогда Росприроднадзор установил, что это выбросы ТЭЦ-5, которая в период сильных холодов работает в максимальном режиме, чтобы обеспечить жителей города тепловой и электрической энергией. На долю станции приходится около половины объема выработки электроэнергии в Омской области. Площадь загрязнений составила 7,7 тысячи гектаров. Росприроднадзор оштрафовал омский филиал ОАО «ТГК-11» за загрязнение окружающей среды после внеплановой проверки, на которой было выявлено, что выпавшие осадки — это зола экибастузских углей, а также сами несгоревшие угли. Использование ТЭЦ-5 высокозольного экибастузского угля обусловлено тем, что станция не может перейти на природный газ, так как по существующим газопроводам перекачать необходимые объемы не получится. При этом перевести станцию на газ без ее полной остановки невозможно. А кузбасский уголь, обладающий меньшей зольностью, на 46 % дороже.

Проведенная проверка установила, что фильтры ТЭЦ-5 работают неэффективно. Решением суда на ОАО «ТГК-11» была возложена обязанность по доведению степени очистки электрофильтров до проектных значений.

Цель работы — разработка рекомендаций по оптимизации электрических режимов питания электрофильтров и режимов работы механизмов встряхивания их электродов.

Электрофильтр, как аппарат газоочистки, функционирует благодаря двум основным электрофизическим процессам — зарядки частиц очищаемого дымового газа ионами коронного разряда и движению заряженных частиц к осадительному электроду под действием сил электростатического поля [1].

Процесс электрической очистки газов заключается в том, что при определенном значении напряжения, приложенного к межэлектродному промежутку, напряженность поля около коронирующего электрода становится достаточной для появления корон-

ного разряда, следствием которого является заполнение внешней части межэлектродного промежутка в основном отрицательно заряженными ионами. Отрицательно заряженные ионы под действием сил электрического поля движутся от коронирующих электродов к осадительным. Частицы золы или пыли, встречая на своем пути ионы, адсорбируют их, заряжаются и под действием сил поля также двигаются к осадительным электродам, где и осаждаются. Электроды периодически встряхиваются, слой осажденной пыли разрушается, и пыль осыпается в бункеры электрофильтра, откуда ее периодически или непрерывно удаляют [2].

Особенностью работы электрофильтра является то, что он обеспечивает максимальную степень очистки при напряженностях электрического поля в межэлектродном пространстве, когда в электрофильтре происходят искровые пробои, но нет перехода в дуговые разряды. Уровень напряжения, при котором происходят искровые пробои, изменяется нелинейно в широком диапазоне и зависит от большого количества факторов: от свойств исходящих газов, от содержания пыли в газе, влажности, температуры, величины частиц пыли, химического состава и их электрической проводимости, условий формирования слоя на осадительных электродах и других факторов. Таким образом, первой проблемой, которую необходимо решить в ходе работы, является разработка алгоритмов изменения напряженности межэлектродного пространства в электрофильтрах, учитывающих динамику свойств фильтруемых газов.

Одной из наиболее сложных проблем в электрогазоочистке является очистка газов от пыли с высоким удельным сопротивлением, какой является зола углей, сжигаемых на Омской ТЭЦ-5. Такие газы приводят к возникновению обратной короны на осадительных электродах, к снижению пробивных напряжений, снижению напряженности электрического поля, увеличению адгезионных свойств слоя на осадительном электроде, его плохой очистке и, как следствие, снижению токовых нагрузок из-за запира-

ющего действия слоя пыли. Эти процессы ведут к снижению степени очистки газов электрофильтрами. Таким образом, второй проблемой является снижение эффекта обратной короны.

Третьей проблемой является вторичный пылеунос, связанный с работой механизмов встряхивания электродов.

Унос пыли, существующий при непрерывном встряхивании осадительных электродов, может быть существенно снижен при реализации оптимального режима встряхивания. Величина снижения уноса за счет оптимизации встряхивания зависит от физико-химических свойств пылегазовой среды. Оптимальный режим встряхивания коронирующих электродов должен поддерживать слой пыли на коронирующих элементах, при котором ток короны обеспечивает наиболее эффективное улавливание пыли в электрофильтре. С другой стороны, интенсивность и частоту встряхивания необходимо выбирать такими, чтобы обеспечить максимально возможный срок службы узлов встряхивания и минимальную расцентровку электродной системы. Таким образом, следующей проблемой, которую необходимо решать, являются разработка и оптимизация алгоритмов управления механизмами встряхивания электродов.

Четвертой проблемой является то, что оценка эффективности работы электрофильтра проводится по контрольным (запланированным обычно раз в год) замерам выбросов предприятия. Для этих целей применяются обычно адсорбционные методы контроля, не позволяющие получать результат в реальном режиме времени. В настоящее время оценка работы электрофильтра в процессе наладки и работы осуществляется по вторичным признакам: напряжению на электродах и ток короны [3].

Таким образом, для оценки степени очистки необходимо внедрение датчиков контроля за пылезоловыбросами, работающими в реальном режиме времени, позволяющими вести техпроцесс очистки по первичным признакам — концентрации взвешенных частиц на выходе электрофильтра.

Пятой проблемой является отсутствие на предприятиях АСУ ТП, объединяющей все оборудование пылегазоочистки в единую систему.

Таким образом, разработка и реализация новых подходов и алгоритмов ведения техпроцесса пылегазоочистки, разработка и внедрение новых устройств на современной элементной базе является актуальной задачей. Такая научно-исследовательская работа позволит разработать устройства и алгоритмы по существенному увеличению эффективности работы газоочистного оборудования без замены силовых агрегатов питания, находящихся в удовлетворительном состоянии, произвести модернизацию морально и физически устаревших средств регулирования высоковольтным напряжением на электродах электрофильтров, решить задачи управления и оптимизации режимами механизмов встряхивания электродов электрофильтров, созданию АСУ ТП.

Результаты обзора отечественной и зарубежной печати, патентных исследований с 1994 г. по 2012 г. позволяют все алгоритмы управления электрическим полем в электрофильтрах систематизировать по следующим способам управления:

- 1) по заданному току или напряжению электрофильтра;
- 2) по мощности коронного разряда;
- 3) по уровню пробивных напряжений в электрофильтре;

- 4) по частоте искровых пробоев в электрофильтре;
- 5) по максимальному среднему напряжению на электрофильтре;

- 6) по последующему полю в многополюсных электрофильтрах;

- 7) по изменению запыленности выходящих газов.

При различных характеристиках пылегазового потока лучшую очистку газа обеспечивает применение разных алгоритмов, в связи с этим наиболее перспективным для обеспечения максимальной степени очистки газов является комбинирование этих алгоритмов в одной системе, это позволит существенно увеличить эффективность работы газоочистного оборудования и произвести модернизацию морально и физически устаревших агрегатов.

В результате проработки направлений исследования были выявлены следующие возможные эффекты от устранения вышеизложенных проблем:

1. Эффективная работа электрофильтров, позволяющая работать в оптимальном режиме для обеспечения максимальной очистки при минимальном потреблении электроэнергии, может быть обеспечена за счет внедрения регуляторов нового типа, позволяющих повысить эффективность очистки газов на 0,6 – 1,2 % за счет микропроцессорной системы оптимизации поддержания напряжения и тока короны, обеспечивающих максимальную вольт-секундную площадь вольт-амперной характеристики с режимами коррекции возникновения обратной короны и управления ее интенсивностью. Кроме того, обеспечивается режим экономии электроэнергии до 50 % за счет применения широтно-импульсной модуляции.

2. Оптимизация работы механизмов встряхивания электродов. Оптимальный режим частоты встряхивания осадительных и коронирующих электродов должен поддерживать слой пыли на электродах, при котором ток короны обеспечивает наиболее эффективное улавливание пыли в электрофильтре. С другой стороны, интенсивность и частоту встряхивания необходимо выбирать такими, чтобы обеспечить максимально возможный срок службы узлов встряхивания и минимальную расцентровку электродной системы. Это позволит оптимизировать процесс встряхивания осадительных и коронирующих электродов, что в соответствии с расчетными методиками НИИОГАЗ приводит к снижению пылезолоуноса в 0,6 – 1,2 раза относительно непрерывного встряхивания. Уменьшение пылезолоуноса обеспечивается за счет снижения вторичного пылезолоуноса. Кроме того, оптимизация работы механизмов встряхивания приведет к увеличению ресурса их работы, уменьшению расцентровок электродной системы и снижению потребления электроэнергии электродвигателями этих механизмов, т.к. после оптимизации пауза в работе некоторых двигателей будет составлять от 40 минут до 2,5 часа.

3. Непрерывный контроль за эффективностью работы пылегазоочистного оборудования и недопущение превышения ПДК в выбросах предприятия с целью поддержания экологии города.

4. Включение в обратную связь регуляторов напряжения электрофильтров датчиков изменений концентрации выбросов в реальном времени с целью управления напряженностями электрических полей для повышения степени очистки.

5. Программное обеспечение SCADA системы для АСУ ТП пылегазоочистки, позволяющее осуществлять непрерывный контроль и управление работой всего пылегазоочистного оборудования.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 51707-2001. Электрофильтры. Требования безопасности и методы испытаний. — Введ. 29-01-2001. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 19 с.
2. Санаев, Ю. И. Электрофильтры: монтаж, наладка, испытание, эксплуатация / Ю. И. Санаев. — М.: ЦИНТИХИМ-НЕФТЕМАШ, 1984. — 25 с. — (Обзорная информация. Сер. ХМ-14).
3. Правила устройства электроустановок. Разд. 1. Общие правила / М-во энергетики РФ. — 7-е изд. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. — 88 с. — ISBN 5-93196-417-7.

НИКОЛАЕВ Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ЛЯШКОВ Алексей Ануфриевич, доктор технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Инженерная геометрия и САПР».

ЕСИМОВ Асет Мухаммедович,

ЛЕОНОВ Виталий Владимирович, студенты гр. Э-121 энергетического института.

Адрес для переписки: MUNP@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14.03.2016 г.

© М. Ю. Николаев, А. А. Ляшков, А. М. Есимов, В. В. Леонов

УДК 621.3.013:621.396.6

**Б. И. ОГОРЕЛКОВ
А. С. ТАТЕВОСЯН
В. О. КРОПОТИН**

Омский государственный
технический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В статье дается техническое описание разработанных лабораторных стендов, результаты экспериментального исследования и математического моделирования экранирования электромагнитного поля промышленной частоты с помощью однослойных и многослойных экранов различной толщины и материалов, применяемых для их изготовления (медь, сталь). Полученные результаты исследований базируются на современных средствах измерительной техники, а также на методах математического моделирования низкочастотных электромагнитных полей с использованием комплекса программ Eiscut 6.0 (профессиональная версия). Достоверность полученных экспериментальных данных экранирования переменного магнитного поля на лабораторных стендах подтверждается результатами численного расчета картин переменного магнитного поля при фиксированной фазе методом конечных элементов и количественной оценкой эффективности экранирования испытываемых образцов экранов.

Ключевые слова: электромагнитный экран, эффект экранирования, многослойный экран, толщина экрана, картина магнитного поля в экранированном пространстве при синусоидальном токе, координата точки измерения, временные зависимости тока и магнитной индукции.

Круг вопросов, связанный с экранированием электромагнитного поля, весьма разнообразен. Электромагнитное экранирование используется для подавления помех электросвязи, обеспечения бесперебойной и нормальной работы систем и устройств измерительной техники, средств автоматизации контроля и управления электрическими нагрузками, электромагнитной совместимости силового и слаботоочного оборудования, снижения вредного и побочного воздействия электромагнитного поля на здоровье человека при его длительном пребывании в производственных и жилых помещениях. Острота проблемы электромагнитного экранирования зачас-

тую связана с наличием концентрированных источников переменного магнитного поля промышленной частоты. Так, например, встроенные в здания и пристроенные незэкранированные трансформаторные подстанции, подземные кабельные линии являются источниками санитарной и техногенной опасности в среде обитания [1, 2]. При расчетах переменных магнитных полей электромагнитные экраны обычно представляются линейными системами с постоянными параметрами. Несмотря на это, решение задачи электромагнитного экранирования зависит от многих факторов. К ним относятся свойства применяемых для экранирования материалов (удельная

электрическая проводимость и магнитная проницаемость), частота изменения поля, толщина стенки и побочные действия наличия экрана (при расположении стального экрана внутри катушки происходит увеличение индуктивности катушки и изменяется ее добротность). Указанные факторы влияют на многообразие вариантов расчета электромагнитных полей с различными конструкциями экранов и усложняют поиск оптимальной их геометрии, обеспечивающей максимальный эффект экранирования.

Решению задачи электромагнитного экранирования поля промышленной частоты посвящено большое число работ [3–5]. В ходе исследований установлено, что экранирующее действие экрана в переменном электромагнитном поле определяется наведенными в толще стенок экрана вихревыми токами и возбужденным этими токами магнитным полем, а также с затуханием электромагнитной волны при ее проникновении внутрь проводящей среды. Эффективность экрана количественно оценивается коэффициентом экранирования, то есть отношением магнитной индукции переменного поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана и при его наличии. Коэффициент экранирования является комплексной величиной, которая по модулю принимает значения больше единицы. Поскольку глубина проникновения поля в металл зависит обратно пропорционально от частоты электромагнитной волны, то увеличение толщины стенки экрана повышает эффективность экранирования. На промышленной частоте 50 Гц достаточная толщина стенки экрана для эффективного экранирования определяется длиной электромагнитной волны (для меди длина волны составляет около 6 см, а для стали — около 0,5 см). Указанные результаты исследований проверены в определенных экспериментальных условиях. Однако степень влияния конфигурации и конструкции экранов, расположения источников поля на эффективность экранирования изучены недостаточно. Окончательный вывод об эффективности экранирования в сложных условиях предусматривает проведение дополнительных экспериментов, что требует привлечения значительных материальных затрат, труда и времени. Отсюда следует, что работы по совершенствованию экспериментальных и численных методов расчета экранирования электромагнитного поля промышленной частоты с различными конструкциями экранов представляют актуальность.

Целью данной статьи является разработка лабораторных стендов для исследования эффектов экранирования с различными конструкциями экранов, изготовленных из магнитных и немагнитных металлов (сталь, медь). Сопоставление опытных и расчетных данных, полученных с использованием современных измерительных приборов и конечно-элементного анализа экранирования электромагнитного поля промышленной частоты в комплексе программ Elcut 6.0 (профессиональная версия).

В разработанном на кафедре теоретической и общей электротехники лабораторном стенде электромагнитный экран расположен внутри катушки, создающей первичное магнитное поле переменного тока. Размеры магнитной системы определены таким образом, чтобы на большей части длины катушки в центральной ее части магнитное поле было практически однородным. Витки катушки по длине распределены двойным слоем (число витков катушки 250, толщина намотки витков 2 мм и длина катушки 120 мм, средний диаметр катушки 40 мм). Для экранирования электромагнитного поля в эксперименте

используются цилиндрические экраны, изготовленные в виде отрезков труб из различных материалов, при этом длина экранов больше длины катушки.

Однослойные экраны имеют следующие геометрические размеры. Медный экран: толщина стенки трубы 6,5 мм, средний диаметр трубы 13,5 мм, длина трубы 170 мм. Стальной экран: толщина стенки трубы 3 мм, средний диаметр трубы 19 мм, длина трубы 170 мм. Многослойный стальной экран состоит из двух отрезков труб длиной 170 мм и толщиной стенки 1,2 мм. Трубы вставлены одна в другую соосно. Наружный диаметр труб 22,3 мм и 15,4 мм. Удельная электрическая проводимость используемых металлов для изготовления экранов: для меди $5,9 \cdot 10^7$ (Ом · м)⁻¹, для стали $10 \cdot 10^7$ (Ом · м)⁻¹. Относительная магнитная проницаемость меди $\mu \approx 1$, стали $\mu \approx 500$.

На рис. 1 представлена электрическая схема лабораторного стенда, а на рис. 2 — общий его вид. В состав электрической схемы входят:

- 1 — катушка, по которой протекает переменный ток i ;
- 2 — цилиндрический экран, экранирующий внешнее магнитное поле;
- 3 — цифровой универсальный миллитесламетр ТПУ-03;
- 4 — датчик Холла, выходное напряжение которого пропорционально магнитной индукции;
- 5 — цифровой амперметр, предназначенный для измерения действующего значения тока катушки $I = I_m / \sqrt{2}$, где I_m — амплитуда тока;
- 6 — измерительный комплекс, в состав которого входит двухканальный универсальный USB осциллограф для регистрации аналоговых сигналов напряжения на измерительном сопротивлении и ЭДС датчика Холла и персональный компьютер ПК.

Внешний вид лабораторного стенда показан на рис. 2.

Экспериментальная часть исследований экранирования магнитного поля на лабораторном стенде с различными экранами сводилась к обеспечению постоянства ампервитков катушки путем изменения сопротивления регулируемого $R_{пер}$ реостата, установке датчика Холла в центральной части катушки вблизи оси симметрии, записи показаний амперметра и миллитесламетра, а также снятию осциллограмм напряжений на измерительном сопротивлении и с датчика Холла. По показанию амперметра отслеживалось действующее значение тока в катушке $I = 3,8$ А. Амплитудное значение ампервитков катушки при этом токе $F_m = 1340$ А.

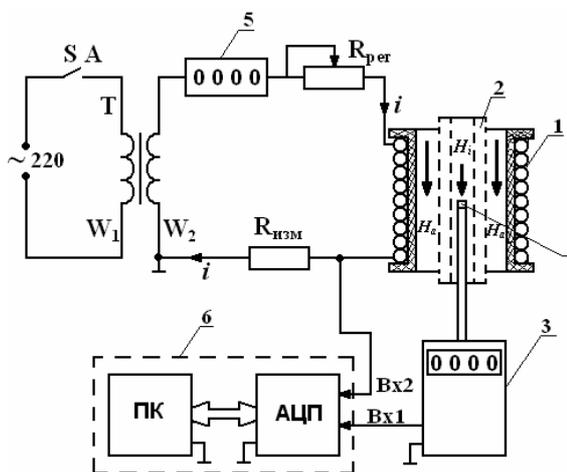


Рис. 1. Электрическая схема лабораторного стенда

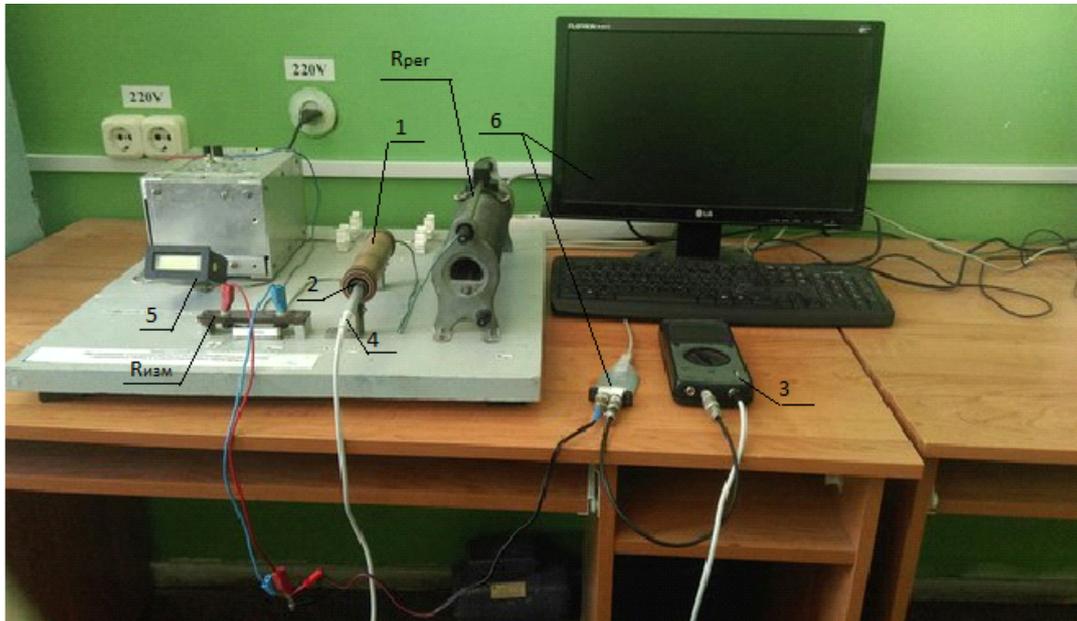


Рис. 2. Внешний вид лабораторного стенда для исследования экранирования переменного магнитного поля катушки с током промышленной частоты

Осциллограммы датчиков сигналов при отсутствии экрана и при его наличии приведены на рис. 3.

Осциллограммы датчиков сигналов позволяют определить временные зависимости тока и индукции магнитного поля с введением масштабных коэффициентов пересчета. Для датчика тока масштабный коэффициент пересчета $K_I = 6,7$ А/В представляет собой отношение амплитудных значений тока в катушке и напряжения на измерительном сопротивлении. Для датчика ЭДС Холла масштабный коэффициент пересчета $K_B = 20,3$ мТл/В находится как отношение амплитудного значения индукции магнитного поля $B_m = 1,57V_{cp}$ на оси катушки по центру к амплитудному значению напряжения с датчика Холла (при синусоидальном токе среднее значение индукции B_{cp} находится по показанию миллитесламетра).

Для разных экранов результаты опытных значений коэффициентов экранирования приведены в табл. 1.

Расчетная часть исследований экранирования переменного магнитного поля промышленной частоты состоит в решении осесимметричной задачи расчета поля катушки с током в комплексе программ Elcut 6.0 при расположении внутри катушки различных по исполнению конструкций цилиндрических экранов. Работа с моделью проводится в полуплоскости $r \geq 0$. Ось вращения z направлена слева направо, ось r — снизу вверх. Вектор магнитной индукции расположен в плоскости модели zr , вектор плотности электрического тока и векторный магнитный потенциал ортогональны к нему и имеют только компоненты отличные от нуля, независимые от угла. Площадь расчетной области моделирования составляет 300×100 мм².

При расчете магнитного поля были приняты следующие допущения:

— вихревые токи, индуцированные в витках катушки переменным магнитным полем, пренебрежимо малы, поэтому в расчете электропроводность катушки не учитывается;

— магнитная проницаемость материала, используемого для изготовления электромагнитного экрана, является величиной постоянной;

— внешняя граница расчетной области модели удалена от катушки с током на расстояние, соответствующее заданию нулевого граничного условия для функции магнитного потока $\psi = r \cdot A = 0$.

Расчет картин магнитного поля катушки с различными конструкциями экранов проводился при одинаковом заданном законе изменения тока в катушке $i = 5,4 \sin(\omega t + 90^\circ)$, соответствующем условиям выполнения экспериментальной части работы. На рис. 4 и 5 приведены картины магнитного поля катушки с электромагнитным экраном, построенные при задании фазы мгновенных значений $\omega t = 0^\circ$, а также графики распределения амплитудных значений магнитной индукции внутри стенки экрана. На картинах магнитных полей сплошными линиями обозначены линии функции магнитного потока $\psi = \text{const}$ (силовые линии). Амплитудное значение функции потока Ψ_m на картинах магнитных полей принимает следующие значения (рис. 4): без электромагнитного экрана (а) $2,65 \cdot 10^{-6}$ Вб, с медным экраном (б) — $1,98 \cdot 10^{-6}$ Вб, со стальным однослойным экраном — $1,91 \cdot 10^{-5}$ Вб, с многослойным стальным экраном — $1,94 \cdot 10^{-5}$ Вб.

На основе расчета картин переменного магнитного поля катушки с различными конструкциями экранов были определены и x коэффициенты экранирования. В табл. 1 приведены результаты сопоставления опытных и расчетных значений коэффициентов экранирования испытываемых экранов.

При расположении источника магнитного поля промышленной частоты внутри экрана оценка эффективности экранирования поля с различными конструкциями экранов определяется результатами исследования процесса проникновения электромагнитного поля внутрь электропроводящей среды. Для этого в лабораторном стенде используются опытные образцы экранов, изготовленные в виде отрезков стальных труб одинакового внутреннего диаметра 30 мм и длиной 40 мм. Толщина стенки однослойных стальных экранов составляет 3 и 6 мм. Многослойный экран состоит из двух отрезков стальных труб толщиной стенки 1,5 мм, разделенных зазором 2 мм. На цилиндрической поверхности испытываемых об-

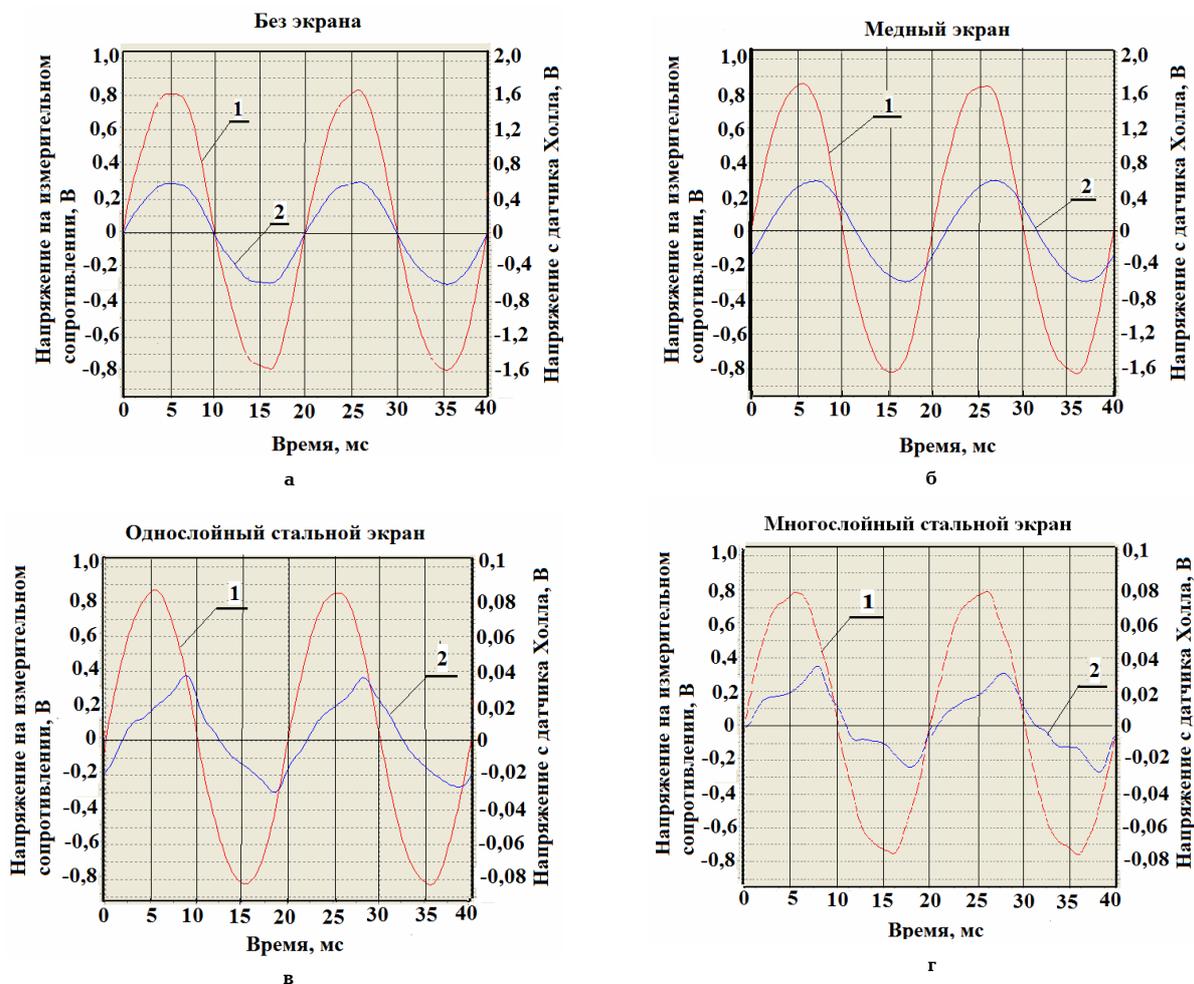


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований:
а, б, в, г — осциллограммы датчиков;
1 — напряжение на измерительном сопротивлении;
2 — напряжение с датчика Холла

Таблица 1

Коэффициенты экранирования
переменного магнитного поля промышленной частоты
для различных экранов

Экран	Опыт		Расчет	
	V_m , мТл	Коэффициент экранирования, о.е.	V_m , мТл	Коэффициент экранирования, о.е.
Без экрана	12,2	—	11,67	—
Медный экран	11,5	$1,06 \cdot e^{j28^\circ}$	10,87	$1,07 \cdot e^{j29^\circ}$
Однослойный стальной экран	0,52	$23,4 \cdot e^{j36^\circ}$	0,48	$24,3 \cdot e^{j39^\circ}$
Многослойный стальной экран	0,63	$19,2 \cdot e^{j17^\circ}$	0,84	$15,2 \cdot e^{j67^\circ}$

разцов экранов расположена тонкостенная сигнальная обмотка, имеющая одинаковое число витков $W_2 = 500$. Экспериментальная часть исследования проникновения поля в стенку экрана заключается в следующем. При подаче сетевого напряжения на лабораторный стенд через понижающий трансформатор (Т) по проводнику с числом витков $W_1 = 1$ будет протекать ток, который возбуждает переменное электромагнитное поле. Регулировка тока в цепи производится с помощью проволочного реостата $R_{рег}$. При проведении эксперимента с различными экранами действующее значение тока в проводнике задано 2 А. Проникновение магнитного поля в стенку

экрана вызывает изменение во времени магнитного потока, который, сцепляясь с витками сигнальной обмотки, индуцирует в них ЭДС. Напряжения на измерительном сопротивлении $R_{изм} = 2$ Ом (датчик тока) и ЭДС сигнальной обмотки на различных экранах регистрируются измерительным комплексом, в состав которого входят USB осциллограф и ПК.

Электрическая схема разработанного лабораторного стенда показана на рис. 6, а на рис. 7 — внешний его вид.

На рис. 8 и 9 приведены осциллограммы напряжений, полученные на лабораторном стенде с опытными образцами экранов.

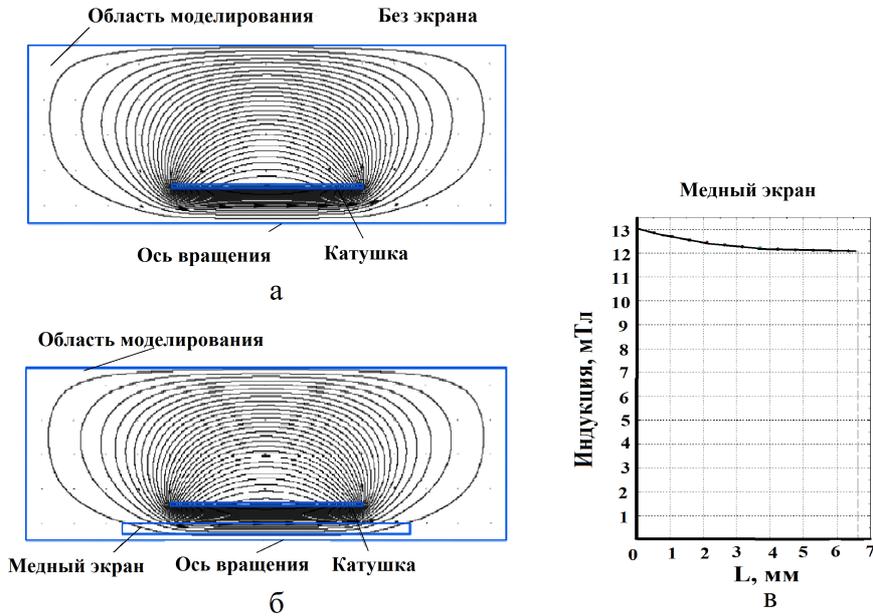


Рис. 4. Картины осесимметричных моделей переменного магнитного поля катушки с током: а — без экрана, б — с медным экраном, в — распределение магнитной индукции внутри стенки медного экрана

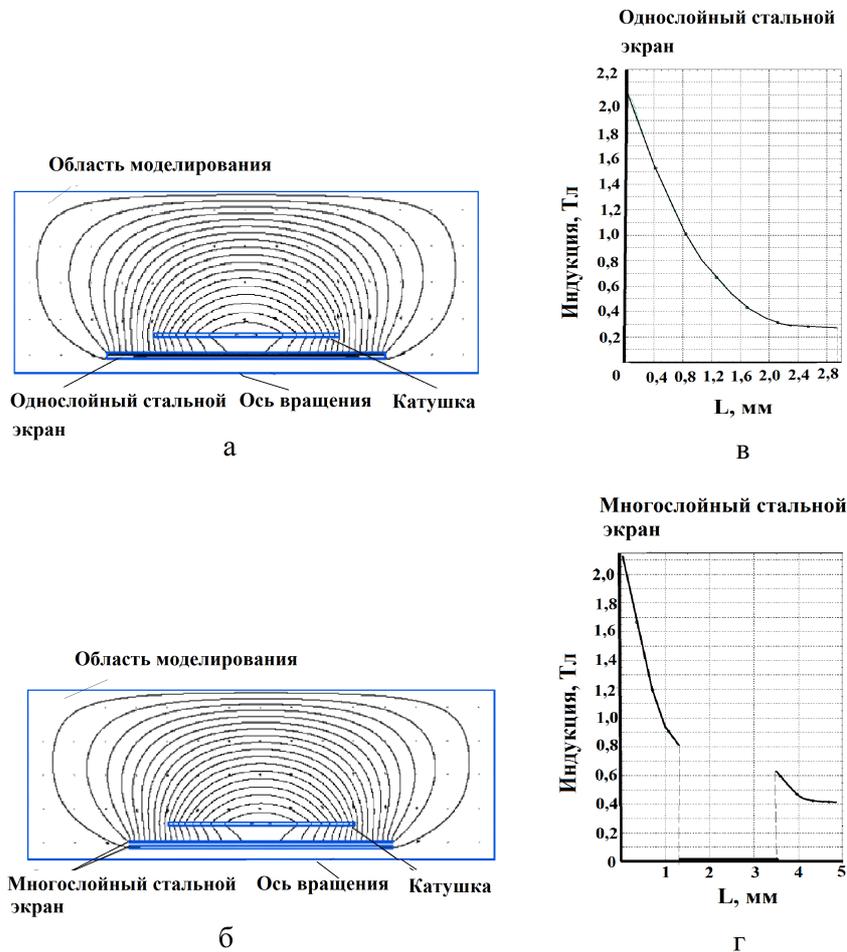


Рис. 5. Картины осесимметричных моделей переменного магнитного поля катушки с током: а — однослойный стальной экран, б — многослойный стальной экран; в, г — распределение магнитной индукции внутри стенки однослойного (в) и многослойного (г) стального экрана

Для сравнения опытных данных, полученных на лабораторном стенде, с результатами расчета проникновения электромагнитного поля в стенку стального экрана в комплексе программ Elcut 6.0 (профес-

сиональная версия) была построена плоскопараллельная модель переменного магнитного поля проводника с током промышленной частоты, помещенным внутрь стального экрана. Допущение в расчете плоско-

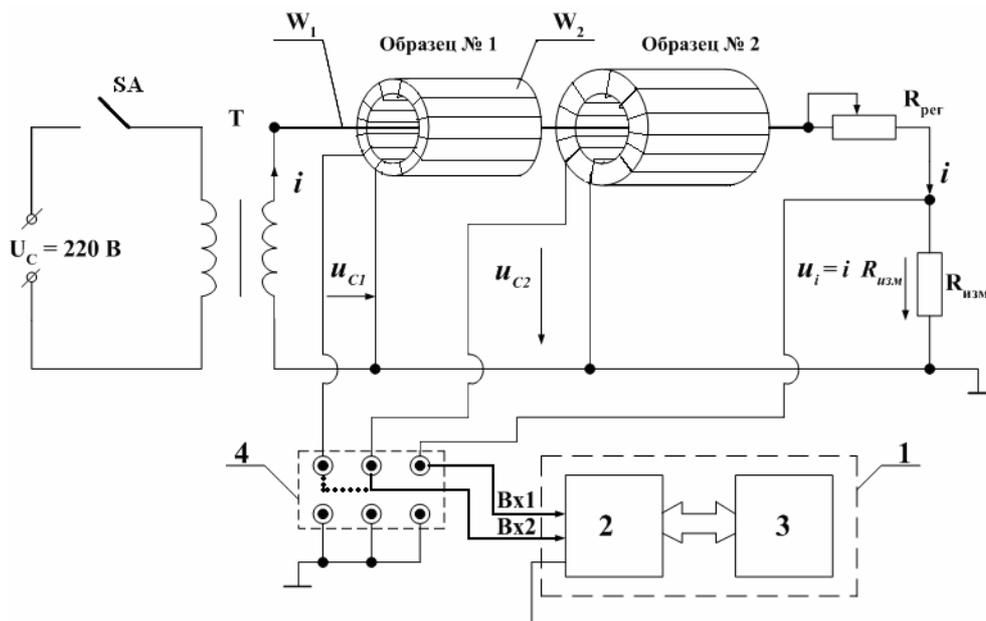


Рис. 6. Электрическая схема лабораторного стенда для исследования проникновения электромагнитного поля в стенку экрана:
1 — измерительный комплекс; 2 — двухканальный универсальный USB осциллограф;
3 — ПК; 4 — звезда для подключения аналого-цифрового преобразователя

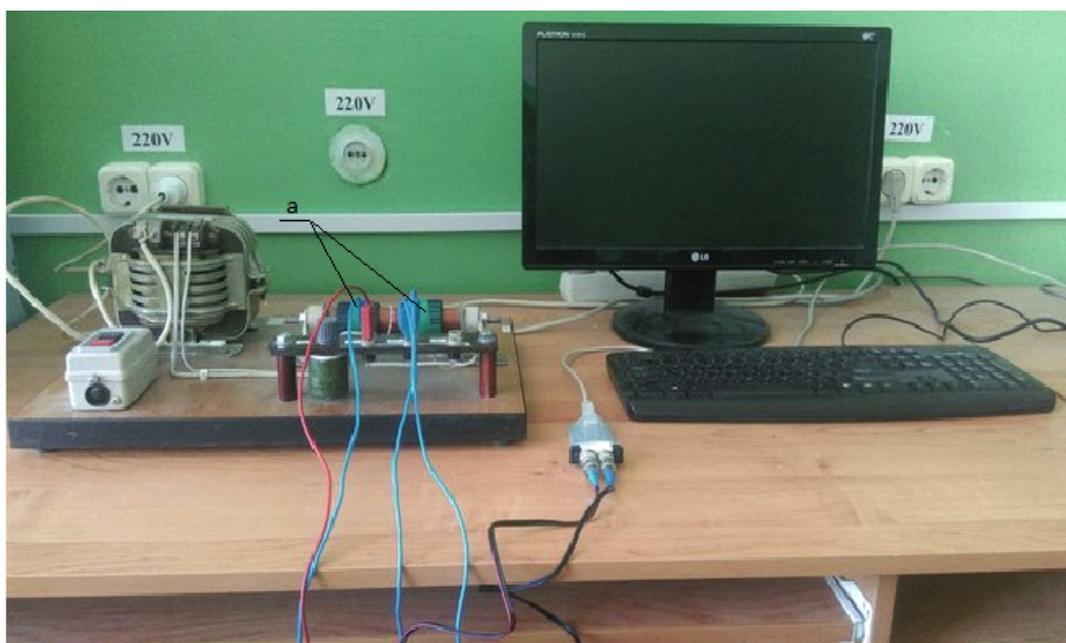


Рис. 7. Внешний вид лабораторного стенда:
а — испытываемые образцы электромагнитных экранов

параллельной картины магнитного поля справедливо для линейных проводников с током и позволяет без проблем с помощью встроенного в пакет Elcut интегрального калькулятора вычислить амплитуду магнитного потока Φ_m в стенке экрана. По значению магнитного потока амплитудное значение индуктированной ЭДС в сигнальной обмотке определяется выражением $E_m = 2\pi f \cdot \Phi_m \cdot w_2$.

При построении плоскопараллельной модели поля в отношении объектов сред (воздух, сталь, проводник с током) используются одинаковые допущения, что при расчете осесимметричной модели поля катушки с электромагнитным экраном. На границе расчетной области принимается значение векторного магнитного потенциала $A=0$. Работа с моделью про-

водится в плоскости xu . Векторный магнитный потенциал и вектор плотности тока в сечении проводника направлен вдоль по оси z . Область моделирования ограничена радиусом 50 мм.

Картины магнитного поля с различными конструкциями экранов, построенные при задании фазы мгновенных значений $\omega t = 0^\circ$, показаны на рис. 10. По результатам расчета картин магнитного поля амплитудное значение векторного магнитного потенциала составляет $A_m = 1,45 \cdot 10^{-5}$ Вб/м. Амплитудное значение магнитного потока в стенке опытных образцов экранов практически не меняется и составляет $\Phi_m = 5,6 \cdot 10^{-7}$ Вб. Это означает, что напряжение (то есть индуктируемая ЭДС) на выводах сигнальных обмоток принимает амплитудное значение 87 мВ.

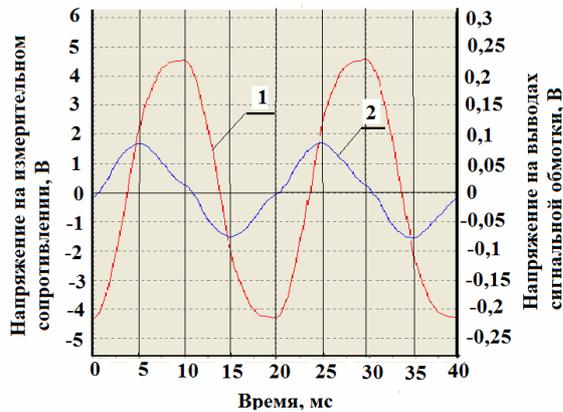


Рис. 8. Осциллограммы напряжений для стального экрана с толщиной стенки 3 мм:
1 — напряжение на измерительном сопротивлении;
2 — ЭДС сигнальной обмотки

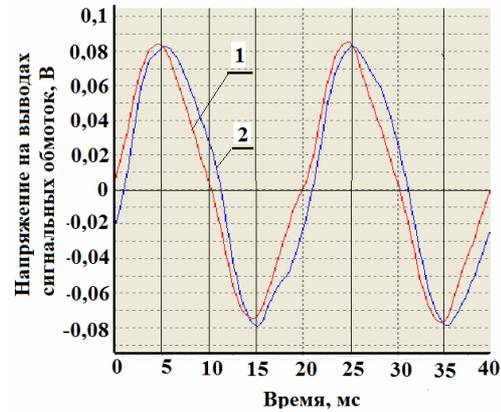


Рис. 9. Сравнение осциллограмм ЭДС сигнальных обмоток:
1 — однослойный стальной экран с толщиной стенки 3 мм;
2 — многослойный стальной экран

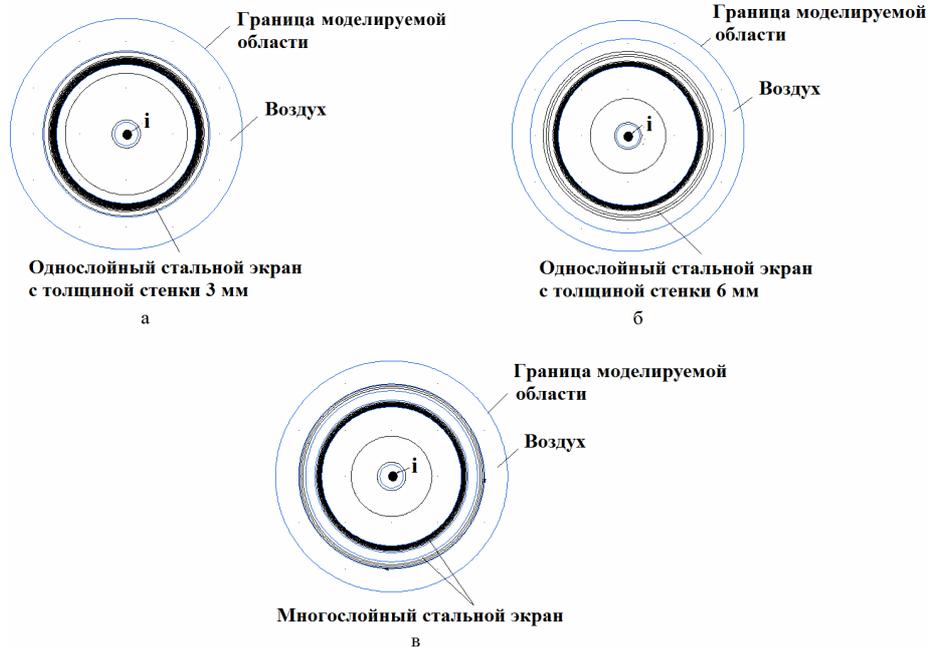


Рис. 10. Картинки переменного магнитного поля для случая, когда источник поля расположен внутри электромагнитного экрана

По результатам расчета картин магнитного поля ЭДС в сигнальных обмотках опережает ток по фазе на угол 45 градусов. Полученные результаты хорошо согласуются с осциллограммами ЭДС сигнальных обмоток (рис. 9), полученные на лабораторном стенде.

Выводы.

1. Потребность использования в энергетике и электротехнике эффективных конструкций электромагнитных экранов для экранирования переменного магнитного поля промышленной частоты делает необходимыми работы по созданию новых лабораторных стендов на основе достижений измерительной техники и использования современных пакетов программ для конечно-элементного анализа переменных магнитных полей с электромагнитными экранами.

2. Применение многослойных стальных экранов с толщиной стенки 1–2 мм для экранирования переменного магнитного поля промышленной час-

тоты не дает ощутимую выгоду по оценке эффективности экранирования, однако при одинаковом расходе металла делает работы по экранированию поля более технологичными.

3. Получено хорошее совпадение опытных данных по экранированию поля с различными конструкциями экранов на разработанных лабораторных стендах и результатов расчета комплексного значения коэффициента экранирования на основе построенных картин переменного магнитного поля с электромагнитным экраном в комплексе программ El-cut 6.0 (профессиональная версия).

Библиографический список

1. Резинкина, М. М. Выбор параметров тонких электромагнитных экранов для снижения уровней магнитной индукции / М. М. Резинкина // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, вып. 2. — С. 1–7.

2. Рябов, Ю. Г. Многослойный электромагнитный экран для защиты среды обитания от электромагнитных воздействий / Ю. Г. Рябов, И. Б. Гуров, Г. В. Ломаев, С. Э. Билецкий [и др.] // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2011. — № 1. — С. 3–7.

3. Каден, Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи / Г. Каден. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. — 327 с.

4. Электромагнитное экранирование: науч. изд. / Д. Н. Шапиро. — Долгопрудный: Издат. дом «Интеллект», 2010. — 120 с.

5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: учеб. / Л. А. Бессонов. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1973. — 752 с.

ОГОРЕЛКОВ Борис Иванович, кандидат технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

ТАТЕВОСЯН Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

КРОПОТИН Владимир Олегович, студент гр. Э-141 энергетического института.

Адрес для переписки: ast_51@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.03.2016 г.

© Б. И. Огорелков, А. С. Татевосян, В. О. Кропотин

УДК 621.311.1:519.2

Н. С. КОСТИН
А. С. ГРИЦАЙ

Омский государственный
технический университет

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ДОВЕРИТЕЛЬНОГО ИНТЕРВАЛА В ЗАДАЧАХ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Рассматривается построение доверительных интервалов при краткосрочном прогнозировании электропотребления. Предложены способы использования доверительных интервалов для частных случаев временного ряда электропотребления.

Ключевые слова: электропотребление, доверительные интервалы, прогнозирование.

Процесс прогнозирования электропотребления является актуальной задачей для субъектов оптового рынка электроэнергии и мощности (далее по тексту субъекта ОРЭМ). Этой задаче уже были посвящены работы [1–6]. Результатом решения таких задач, является прогноз электропотребления (далее по тексту ЭП), продленный на L значений вперед, где ($L \geq 1$ часа). Обозначим процесс электропотребления функцией $V(t)$, где t — интервал времени, тогда $V(t+L)$ — временной ряд, продленный на L значений вперед. Обычно, на практике, требуется продление временного интервала на интервале $L=24$. Как правило, у субъекта ОРЭМ существует наработанная методика осуществления краткосрочного прогноза электропотребления [7–8]. При этом эксперт принимает решение о корректности полученных данных, оценивая риски использования того или иного метода краткосрочного прогноза ЭП. Для принятия такого решения эксперту необходимо иметь дополнительные характеристики, которые описывают свойства полученного прогноза. Одной из таких характеристик является среднее геометрическое значение отклонения для оценки точности прогностической модели. Однако этого тоже недостаточно, поскольку характеристика показывает общую ошибку временного ряда.

Другой, более подходящей характеристикой может служить относительная мера η — число случаев, когда фактическая реализация охватывалась интер-

вальным прогнозом ЭП по отношению к общему числу прогнозов ЭП:

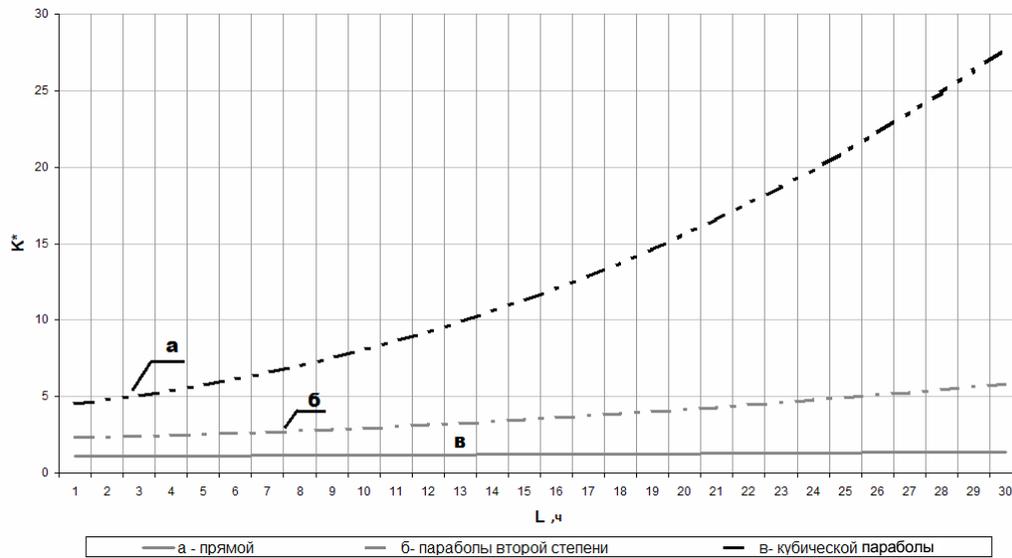
$$\eta = \frac{p}{p+q}, \quad (1)$$

где p — число прогнозов, подтвержденных фактическими данными, а q — число прогнозов, не подтвержденных фактическими данными. Такая характеристика часто используется, когда прогнозные данные прошлого периода не были подтверждены документально. Для использования этой характеристики необходимо построение доверительных интервалов прогноза. Более того, доверительный интервал, отображенный графически, на L шагов дает эксперту возможность оценки не только значения прогноза, но и его доверительного интервала с заранее определенной степенью точности. Из [9] известно, что существует несколько способов построения такого интервала. Доверительные интервалы различаются по типу огибающей функции. Рассмотрим данные функции.

В общем виде доверительный интервал определяется по формуле [10]:

$$s_y K^* = t_{\alpha} s_y \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{1}{\sum t^2} t_L^2}, \quad (2)$$

где n — число измерений, на основе которых строится прогноз;

Рис. 1. Зависимость коэффициента K^* от длительности прогноза

L — число отсчетов на которые продляется тренд;
 t_α — значение t -статистики Стьюдента;
 s_y — среднеквадратическое отклонение тренда;
 t_L — время продленного на L тренда;
 $t_L = n+L$ и t изменяется в пределах от 1 до n .

Если в данной формуле подставить вместо t_L $n+L$, то получим, что значение K^* зависит от периода упреждения, при увеличении продолжительности наблюдения n , значения K^* уменьшаются. С ростом величины L значения K^* растут. Данная формула описывает линейный доверительный интервал.

Рассмотрим способы построения доверительных интервалов в зависимости от типагибающей функции. Ниже представлены функции построения доверительных интервалов на основе полиномиальной модели (3) и гиперболического куба (4)

$$s_y K^* = t_\alpha s_y \sqrt{1 + \frac{1}{\sum t^2} t_L^2 + \frac{\sum t^4 - (2\sum t^2)t_L^2 + n t_L^4}{n \sum t^4 - (\sum t^2)^2}}, \quad (3)$$

$$s_y K^* = t_\alpha s_y \sqrt{1 + \frac{1}{\sum t^2} t_L^2 + \frac{\sum t^4 - (2\sum t^2)t_L^2 + n t_L^4}{n \sum t^4 - (\sum t^2)^2} + \rightarrow} \\ \rightarrow + \frac{(\sum t^6 - 2\sum t^4)t_L^2 + (\sum t^2)t_L^6}{\sum t^2 \sum t^6 - (\sum t^4)^2}, \quad (4)$$

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента K^* при увеличении интервала прогноза $K^*(t+L)$, где L находится в интервале от 1 до 30 часов.

Чтобы построить доверительные интервалы для краткосрочного прогнозирования ЭП необходимо продлить линию тренда временного ряда ЭП и одновременно с продлением линии тренда строить доверительные интервалы, рассчитанные на основе отклонения фактических данных от прогнозируемых. В качестве метода прогнозирования ЭП возьмем за основу метод скользящего среднего [11] и продлим линию тренда на 10 отсчетов (1 отсчет — 1 час). Рассчитав среднее квадратическое отклонение (далее по тексту — СКО) на основе $n = 20$ отсчетов построим доверительные интервалы, используя формулу (1). Доверительных интервалов будем строить два: для доверительной вероятности $p = 0,8$ и для $p = 0,9$. По итогам расчетов был получен график на рис. 2.

Из анализа графика следует: метод скользящего среднего не подходит в качестве базового метода прогнозирования при построении доверительного интервала ЭП. Прямой доверительный интервал слишком узок и при развороте тренда в него не попадает реальное значение (область a на графике). Таким образом, если не ожидается резкого скачка тренда, то для долгосрочного прогнозирования необходимо комбинировать этот метод с классическими статистическими методами.

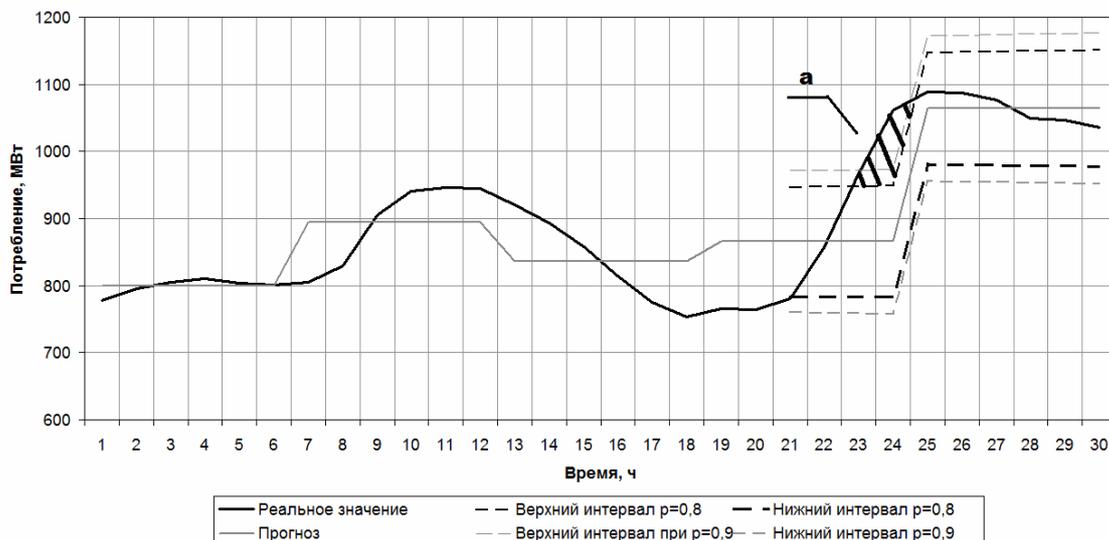
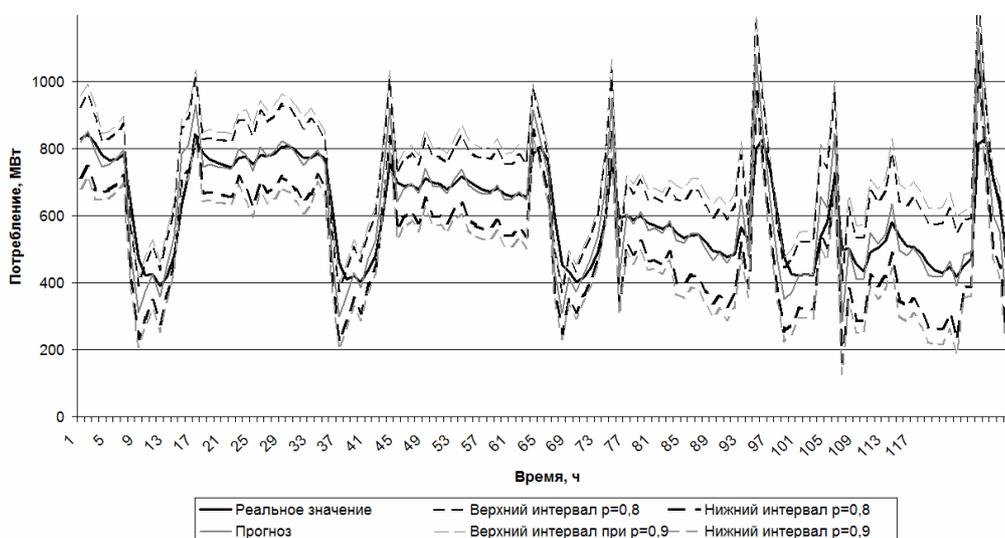
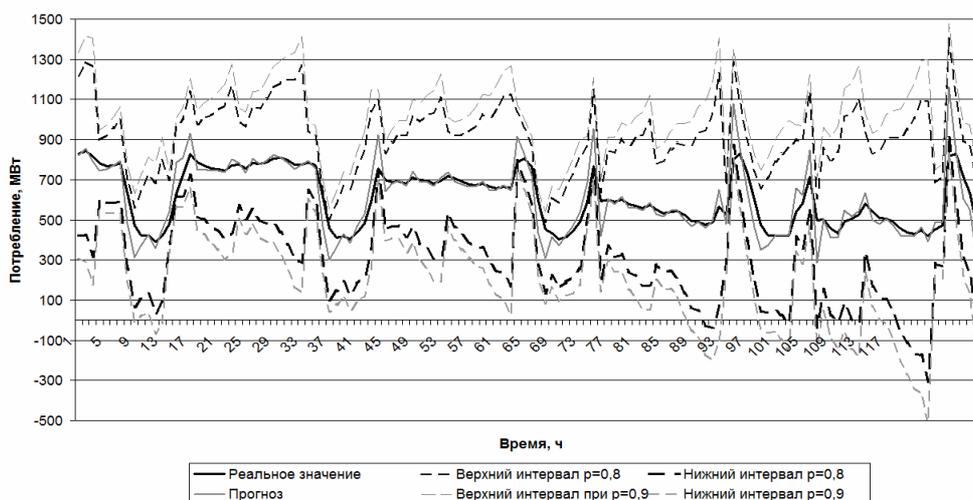
При построении прогноза электропотребления на рис. 3, 4 использовался метод линейной регрессии [6]. С помощью этого метода был построен прогноз на сутки, на основании данных о потреблении предыдущих трех суток. На рис. 3, 4 представлены графики прогноза в интервале 160 часов. При этом по графикам видно различие форм представления доверительных интервалов.

Проведенные исследования показали, что доверительный интервал, построенный на основе параболы второй степени целесообразно использовать для равномерного временного ряда. Как видно из графика на рис. 3, при резком падении тренда метод сужает рамки интервала, ожидая дальнейшего продолжения падения, в результате чего при изменении тренда на подъем — фактические значения выходят за границы доверительного интервала.

Как видно из графика на рис. 4, метод, использующий гиперболическую параболу, лишен данного недостатка. Все фактические значения попали в границы доверительного интервала. Однако можно наблюдать, что даже в отсутствие перепадов доверительный интервал гиперболической параболы довольно широк и целесообразно его использовать лишь в определенных случаях, например, при резком падении тренда.

Рассмотрим применение различных доверительных интервалов на коротких выборках ($n = 20$) данных.

Доверительные интервалы для t_L ($n=20, L=20$) представлены на рис. 5. Если при решении задачи прогнозирования электропотребления на шаге $t+L$ показано явное падение линии тренда, для построения доверительного интервала больше подходит метод, основанный на параболе второй степени, а при резком изменении тренда — метод, основанный на гиперболической параболе.

Рис. 2. Прямой доверительный интервал при $n=20$, $L=10$ Рис. 3. Доверительный интервал параболы второй степени при $n+L=160$ часовРис. 4. Доверительный интервал гиперболической параболы, $n+L=160$

Для графика на рис. 5 была рассчитана характеристика η по формуле 1. Для данных двух суток были получены следующие результаты. В доверительный интервал не попало три значения ($q=3$)

и $\eta=0,85$. При пересчете этим же методом данных за год в доверительный интервал $q=1337$ и $\eta=0,846$.

Та же мера точности была получена и для остальных форм доверительных интервалов. Эта мера равна

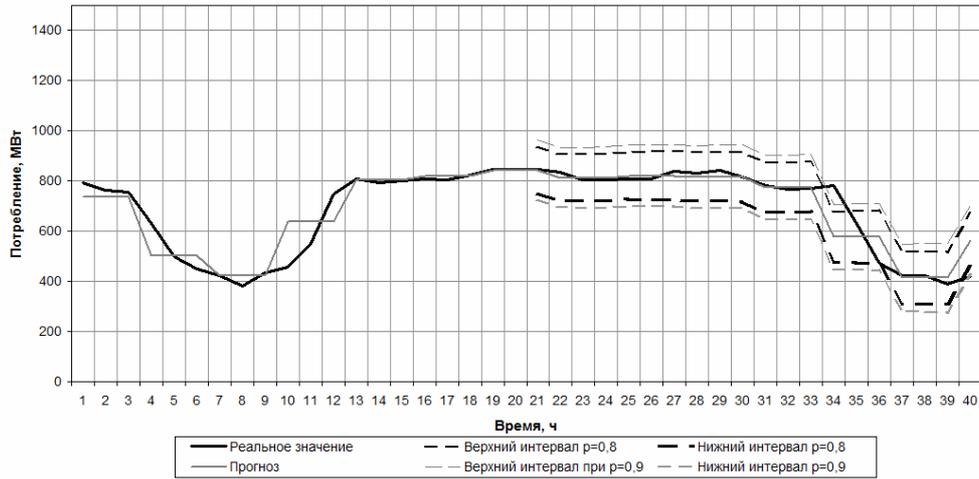
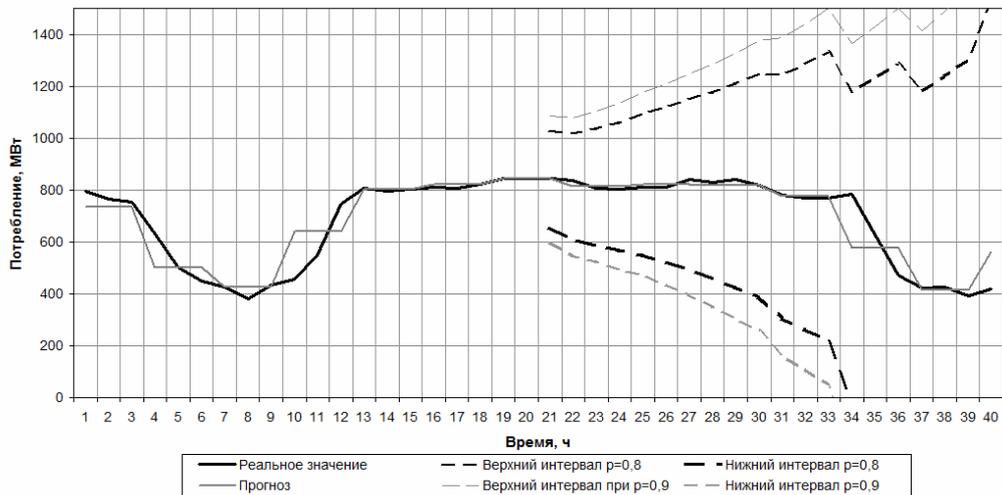
Рис. 5. Прямой доверительный интервал, $n=20$, $L=20$ Рис. 6. Доверительный интервал гиперболической параболы, $n=20$, $L=20$

Таблица 1

Число попаданий в доверительные интервалы

	прямой 2 дня	прямой год	параболич. 2 дня	параболич. год	гиперболич. 2 дня	гиперболич. год
q	3	1337	1	650	0	72
n	0,85	0,845	0,95	0,925	1	0,99

единице, если все реальные значения попали в доверительный интервал прогноза иначе — меньше единицы. Результаты представлены в сводной табл. 1.

Если проанализировать данные таблицы, очевидно, что меньше всего выходов за границы доверительного интервала у метода, использующего функцию гиперболической параболы, однако если посмотреть на график на рис. 6, можно увидеть, что интервал просто слишком широк, верхняя граница интервала допускает ошибку прогнозирования выше 50 %, и использование такого интервала не может помочь эксперту в прогнозе.

Заключение. Таким образом, для эксперта целесообразно представление не только ожидаемых значений прогнозируемой во времени величины ЭП, но и отображение графика, полученного временного ряда ЭП на интервале L , с отображением доверительных интервалов. Актуальным остается вопрос о целесо-

образном уровне доверительной вероятности, при построении доверительных интервалов. Увеличение вероятности приводит к сужению интервала так, что фактические значения могут чаще выходить за его границы. При слишком низком уровне вероятности интервал, напротив, оказывается чрезмерно широким, что приводит к увеличению неопределенности и затрудняет принятие решений при планировании режимов электроэнергетической системы. Оптимальный уровень вероятности выбирается на основе опыта применения интервальных прогнозов. В программной реализации метода прогнозирования должна предусматриваться возможность задания и изменения параметра уровня доверительной вероятности. Кроме того, в случаях, когда идет значительное увеличение/уменьшение ЭП, целесообразно выводить на график несколько доверительных интервалов с различной степенью вероятности.

Библиографический список

1. H. S. Hippert, Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation IEEE Trans, H. S. Hippert, C. E. Pedreira, R. C. Souza, Power Systems, Athens, 2001, 16, pp. 44–55.
2. P. J. Brockwell, R. A. Davis, Introduction to Time Series and Forecasting, Springer, New York, 1996.
3. V. Kaminski, The challenge of pricing and risk managing electricity derivatives, The US Power Market, Risk Books, London, 1997.
4. J. F. Kreider, J.S. Haberl, Predicting Hourly Building Energy Use: The Great Energy Predictor Shootout – Overview and Discussion of Results, ASHRAE Transactions, 1994, 100, pp. 1104–1118.
5. S. Ruzic, Weather sensitive method for short-term load forecasting in electric power utility of Serbia, S. Ruzic, A. Vuckovic, N. Nikolic, IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18, pp. 1581–1586.
6. Aayush Goel, Agam Goel, Regression Based Forecast of Electricity Demand of New Delhi, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 4, 2014.
7. A. Eisa, S. Hassan, A methodology for Electric Power Load Forecasting, Alexandria Engineering Journal, 2011, 50, pp. 137–144.

8. C. Saraswata, E. Zivot, A new method of projection-based inference in GMM with weakly identified nuisance parameters, Department of Economic, University of Washington, 2009, Issue 164 (2).

9. Четыркин, Е. М. Статистические методы прогнозирования / Е. М. Четыркин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Статистика, 1997. – 199 с.

10. Бучатская, В. В. Методика определения интервальных оценок при прогнозировании методами экстраполяции / В. В. Бучатская // Вестник Адыгейского гос. ун-та. Сер. 4. Естественно-математические и технические науки. – 2012. – № 3 (106). – С. 136–140.

КОСТИН Николай Сергеевич, ассистент кафедры информатики и вычислительной техники.

Адрес для переписки: darth_nick@mail.ru

ГРИЦАЙ Александр Сергеевич, старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники.

Адрес для переписки: aleksandr.gritsay@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.03.2016 г.

© Н. С. Костин, А. С. Грицай

УДК 621.313

**Т. А. НОВОЖИЛОВ
А. Н. НОВОЖИЛОВ
А. А. ЛЯШКОВ
Е. М. ВОЛГИНА**

**Омский государственный
технический университет**

**Павлодарский государственный
университет им. С. Торайгырова,
Республика Казахстан**

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПРОВОДНИКЕ ДЛЯ НУЖД РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Современные трансформаторы тока широко используются в релейной защите. Они имеют значительные размеры и стоимость из-за обеспечения необходимого класса изоляции первичной обмотки относительно сердечника и вторичной обмотки. В предлагаемой работе сделан анализ известных методов измерения переменного тока в проводнике для нужд релейной защиты с целью выбора того метода, который поможет избавиться от этих недостатков. Окончательный выбор типа измерительного преобразователя для реализации того или иного устройства защиты электроустановок основывается на его возможности использования, точности измерений и стоимости.

Ключевые слова: методы измерения, переменный ток, трансформатор тока, измерительные преобразователи.

Введение. Видов первичных измерительных преобразователей тока много. В настоящее время в релейной защите основным видом является трансформатор тока [1, 2]. Он имеет ферромагнитный сердечник и две обмотки. Его первичная обмотка подключается к цепи измеряемого тока, а вторичная — к токовым обмоткам реле защиты. В качестве вторичного преобразователя часто используют трансреакторы. Они состоят из ферромагнитного сердечника с воздушным зазором и двух обмоток. По его первичной обмотке протекает измеряемый ток, а во вторичной индуцируется пропорциональная ему ЭДС.

Известно, что современные высоковольтные трансформаторы тока и трансреакторы имеют значительные размеры и стоимость из-за обеспечения необходимого класса изоляции первичной обмотки относительно сердечника и вторичной обмотки. На основании опыта эксплуатации и теоретического анализа принято, что для обеспечения правильной работы большинства устройств релейной защиты погрешность трансформаторов тока не должна превышать по току ΔI 10 %, а по углу δ — 7 % [1].

В то же время известно много других методов измерения токов в проводниках, которые позволяют

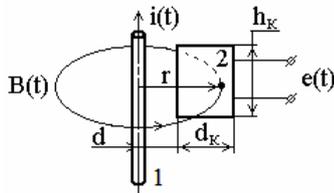


Рис. 1. Схематическое изображение использования магнитного трансформатора тока

использовать для этого более простые и дешевые устройства.

То есть вопрос о переходе с трансформаторов тока на другие датчики тока настолько значителен, что в 2001 году он рассматривался специально на 38-й сессии СИГРЭ в Париже на заседании, посвященном теме замены трансформаторов тока новыми датчиками тока и влиянию их на проектирование защит. Однако вопрос такого перехода невозможен без анализа достоинств и недостатков всех наиболее известных способов контроля тока в проводниках, что и осуществляется в этой работе.

Магнитные трансформаторы тока (МТТ) предназначены для питания токовых цепей релейной защиты в установках высокого напряжения [1, 3]. Схематическое изображение использования МТТ приведено на рис. 1, где по проводу 1 высокого напряжения протекает подлежащий контролю ток $i(t)$, который создает магнитное поле и индуцирует в обмотке 2 МТТ электродвижущую силу $e(t)$.

Удобство такой системы состоит в том, что обмотку МТТ можно размещать на заземленных элементах конструкции электрического устройства на безопасном расстоянии от высоковольтного проводника с контролируемым током $i(t)$ [1]. По рис. 1 в соответствии с законом Био – Савара – Лапласа магнитная индукция от проводника с током

$$B = \mu_0 \cdot I / 2\pi r, \quad (1)$$

где I — амплитудное значение контролируемого тока в проводнике; r — расстояние.

Если в МТТ в качестве обмотки используется плоская катушка [3] с размерами $d_k \cdot h_k$, то амплитуда индуцированной в ней ЭДС

$$e_{\text{МТТ}} = -M_{\text{МТТ}} \cdot (di/dt) \cdot \sin\varphi, \quad (2)$$

где φ — угол между вектором индукции \vec{B} магнитного поля от проводника с током и плоскостью обмотки МТТ; $M_{\text{МТТ}}$ — взаимная индуктивность провода с током и обмоткой преобразователя, который зависит от размеров МТТ и расстояния между проводом с током и МТТ при $\varphi = 90^\circ$.

Из выражения (1) видно, что сокращение расстояния между проводником с контролируемым током и обмоткой МТТ вдвое приводит к увеличению индуцируемой в ней ЭДС в четыре раза. С целью повышения электромеханических характеристик МТТ это расстояние должно быть минимальным. Однако минимально возможное расстояние ограничено изоляционными свойствами среды. Сократить его в несколько раз можно, если обмотку МТТ поместить в полый опорный изолятор, как это показано на рис. 2а, где 1 — проводник с током, 2 — обмотка МТТ, 3 — полый опорный изолятор, являющийся защитой обмотки МТТ от электрических и механических повреждений [4, 5].

Если МТТ используется для контроля тока в проводе одной из фаз трехфазной линии, то для него помехами будут являться магнитные поля от токов в других фазах, от токов утечек на землю и токов в соседних линиях.

От влияния этих полей в значительной мере можно отстроиться по-разному. Так, в американской конструкции [5] датчик соленоидального типа расположен в головке полого опорного изолятора, поддерживающего провод с контролируемым током, как показано на рис. 2а. При этом коэффициент помехи не превышает 0,02.

В [4] для этого используется ферромагнитный сердечник П-образной формы и две обмотки с одинаковым числом витков, которые наматываются на полюса этого сердечника. Эти обмотки соединяют встречно последовательно или встречно параллельно, как это показано на рис. 2б. Такая конструкция МТТ значительно лучше защищена от помех.

В [6] для компенсации помех от магнитных полей токов других фаз, кроме основной, используют дополнительные обмотки. При контроле тока в проводе одной из фаз обмотки всех трех датчиков соединяются последовательно. Защиту от помех со стороны токов в земле и в соседних линиях предложено осуществлять с помощью магнитных экранов.

Такие конструкции МТТ целесообразно использовать только при напряжении до 35 кВ включительно. Для более высоких напряжений стоимость устройства резко возрастает, так как для его реализации потребуются полый несоставной опорный изолятор специальной конструкции на это напряжение.

Принципиально новый эффект в смысле защиты от помех можно получить, применяя остронаправленные дифференциальные датчики МТТ, которые разработаны в ОРГРЭС [7]. Вид одного из них приведен на рис. 3.

В данном случае дифференциальный магнитный датчик встроен в двойную гирлянду подвесных изоляторов 1, поддерживающую провод 2 с контролируемым током. Роль П-образного сердечника

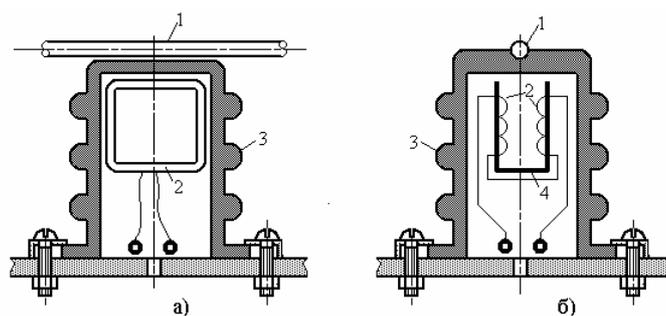


Рис. 2. Конструктивные особенности простейших МТТ

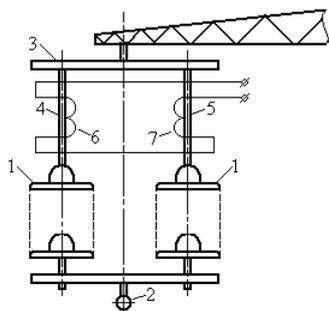


Рис. 3. Магнитный трансформатор тока ОРГРЭС типа ТВМГ

выполняют коромысло 3 и серьги 4 и 5 гирлянд со стороны заземленной траверсы опоры. На серьги, как полюса сердечника, надеты катушки 6 и 7. В данной конструкции магнитная связь катушек с проводом улучшена благодаря тому, что магнитный поток, вызывающий ЭДС полезного сигнала, частично проходит по ферромагнитным элементам подвесных изоляторов гирлянды. МТТ типа ТВМГ устанавливают непосредственно на линии высоковольтного распределительного устройства. В открытом распределительном устройстве используют МТТ типа ТВМП. Его, как правило, устанавливают на стойке разъединителя контролируемого присоединения.

Очевидно, мощность, отдаваемая МТТ, в сравнении с мощностью ТТ невелика. В связи с этим практическое применение МТТ в схемах релейной защиты возможно лишь благодаря разработке специальных устройств релейной защиты с малым потреблением токовых цепей.

Рассмотренные особенности МТТ и определяют область их использования. Так, МТТ могут найти широкое применение для питания токовых защит понизительных трансформаторов подстанций без выключателей на стороне высшего напряжения. В связи с тем, что МТТ не имеют гальванического контакта с высоким напряжением, их установку и проверку можно осуществлять без снятия напряжения. Принципиально возможна реализация переносных защитных комплектов в виде МТТ и защитного устройства для вновь вводимого оборудования.

МТТ могут быть применены в некоторых устройствах системной и подстанционной автоматики, в частности для питания устройств, предназначенных для определения поврежденного участка на линиях высокого напряжения.

Катушка Роговского, а также ее достоинства и недостатки известны давно [8]. Однако при появлении недорогих цифровых микропроцессоров с памятью

и АЦП они обрели второе дыхание. В результате были разработаны промышленные датчики тока [9], в которых погрешность измерения тока в диапазоне от 70 мА до 70 А не превышает 0,1%. Принцип работы этих датчиков основан на измерении напряжения на выводах нескольких прямоугольных катушек, размещенных рядом с проводником, как показано на рис. 4а. Плоскость каждой из соединенных последовательно катушек перпендикулярна силовым линиям поля.

Основной проблемой преобразователей на основе катушки Роговского является обеспечение надежной защиты от внешних магнитных полей, особенно низкочастотных. Поскольку экранирование здесь неэффективно, то эти поля могут существенно увеличить погрешность измерения. Однако по сравнению с МТТ эти катушки меньше, легче и дешевле. Так как ферромагнитный сердечник отсутствует, то они способны обеспечить широкую полосу частот без искажения сигнала.

На основе катушки Роговского ОЗАП Мосэнерго [10] разработал оригинальный МТТ нулевой последовательности в виде двух многовитковых спиралей. Влияние внешних полей уменьшается за счет использования двух спиралей, намотанных в разных направлениях. Схематическое изображение такого МТТ приведено на рис. 4б.

Точность измерения токового датчика на основе катушки Роговского невысока, т.к. коэффициент передачи, определяемый, в основном, значением индуктивности M , зависит от физических параметров, которые трудно контролировать при массовом производстве.

В настоящее время технологический разброс параметров катушки Роговского составляет 2–5%.

Опволоконные преобразователи тока Их работа основана на эффекте Фарадея. Обычно эти преобразователи используются в высоковольтных оптических измерительных трансформаторах тока и преобразователях тока [11]. В качестве чувствительного элемента в них используется токовая головка из одного или нескольких витков оптического волокна, по которому проходит лазерный луч. Проводник с контролируемым током $i(t)$ в центре пересекает плоскость этих витков. В результате, под действием магнитного поля тока, происходит поворот плоскости поляризации лазерного луча. Угол поворота пропорционален произведению длины пути светового луча в среде оптического волокна вдоль силовой линии магнитного поля на его напряженность.

Токовая головка устанавливается на вершине изоляционной колонны, как показано на рис. 5а. Эта колонна выполняет функцию опоры токоведущей

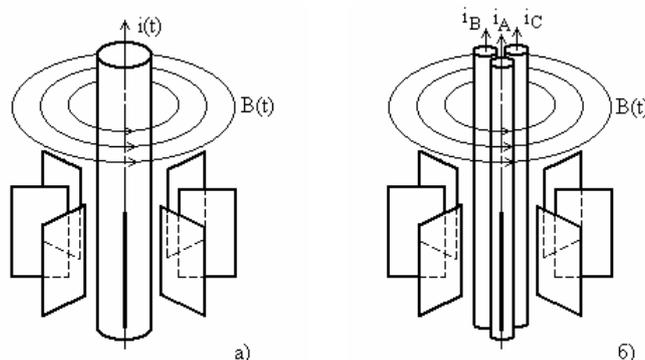


Рис. 4. Схематическое изображение преобразователя тока в виде катушки Роговского

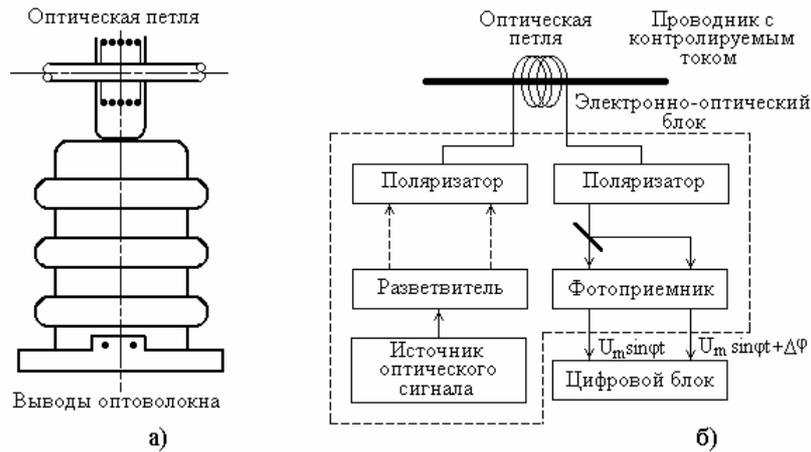


Рис. 5. Структурная схема оптоволоконного датчика тока с электронно-оптическим блоком

шины. Оптическое волокно проходит внутри этой колонны и соединяется с электронно-оптическим блоком, электрический сигнал на выходе которого пропорционален измеряемому току [12–14]. При этом первичный оптический преобразователь может быть удален от блока электроники на 450–900 м.

Упрощенная блок-схема одного из типов оптоволоконного датчика тока приведена на рис. 5б. Она имеет источник оптического сигнала, который с помощью разветвителя преобразуется в два право- и левополяризованных сигнала с противоположными направлениями вращения. В оптической петле из N витков, под действием магнитного поля проводника с током I , в соответствии с эффектом Фарадея, один из этих сигналов ускоряется, а другой замедляется. В следующем круговом поляризаторе эти сигналы преобразуются в линейно поляризованные световые потоки с плоскостями поляризации, сдвинутыми на угол

$$\Delta\varphi = 4V \cdot N \cdot I, \quad (3)$$

где V — постоянная Верде, которая характеризует магнитное вращение плоскости поляризации в веществе и зависит от свойств вещества, длины волны и монохроматичности излучения.

Оптоволоконные преобразователи тока используются для измерения переменных или постоянных токов и имеют высокие потенциальные возможности. К ним следует отнести широкий диапазон измерений, линейность преобразования сигнала и устойчивость оптоволоконных информационных каналов к внешним электромагнитным помехам, широкий частотный диапазон и низкие массогабаритные показатели.

Так, например, выпускаемые канадской компанией Nxt Phase Corporation оптоволоконные трансформаторы тока способны обеспечить класс точности измерений не хуже 0,25 и возможность измерения до 100 гармоник. При этом его вес для класса напряжения 220 кВ составляет порядка 65 кг при массе традиционных трансформаторов в пределах от 900 до 1100 кг.

Использование оптоволоконных преобразователей тока особенно эффективно в электрических сетях среднего и высокого напряжения в связи с тем, что такие сложные вопросы, как обеспечение изоляции, решаются автоматически, за счет физической природы преобразования.

Несомненным недостатком оптоволоконных трансформаторов тока является высокая сложность и стоимость по сравнению с традиционными ТТ [13, 14]. Другими существенными недостатками являются большие размеры электронно-оптического блока и его вес. При этом потребляемая мощность составляет не менее 100 Вт.

В то же время затраты на организацию точки учета электроэнергии с использованием ОТТ уже сейчас, при напряжениях 110 кВ, значительно ниже, чем с применением традиционных ТТ.

Учитывая указанные достоинства и недостатки оптоволоконных трансформаторов тока, можно утверждать, что в настоящее время развивать релейную защиту и автоматику на основе ОТТ, без одновременного использования получаемой от ОТТ информации в системах учета электроэнергии, нецелесообразно [15].

Гальваномагнитные преобразователи тока. Их принцип действия основан на эффекте Холла [16]. Эффект Холла заключается в появлении напряжения на концах полоски проводника или полупроводника, помещенного перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Конструкции гальваномагнитных преобразователей тока с использованием датчика Холла приведены на рис. 6, где 1 — проводник с измеряемым током; 2 — ячейка Холла; 3 — операционный усилитель; 4 — вторичная обмотка; 5 — термочувствительный резистор.

С учетом направления магнитного поля для медного проводника с током напряжение Холла составляет ± 24 мкВ/кГс, а для полупроводника свыше ± 110 мВ/кГс. Этого вполне достаточно для построения промышленных датчиков тока, главными преимуществами которых являются отсутствие вносимых потерь и «естественная» гальваническая развязка. В линейных датчиках Холла выходное напряжение пропорционально приложенному магнитному полю, за исключением режимов симметричного насыщения. На рис. 6а и 6б схематически представлены преобразователи тока разомкнутого и замкнутого типов.

Преобразователи замкнутого типа имеют компенсирующую обмотку, что позволяет обеспечить высокую точность и более широкую полосу пропускания. Они не имеют выходного смещения при нулевом токе, а их чувствительность прямо пропорциональна числу витков компенсирующей обмотки. Однако по стоимости они приближаются к трансформаторам тока.

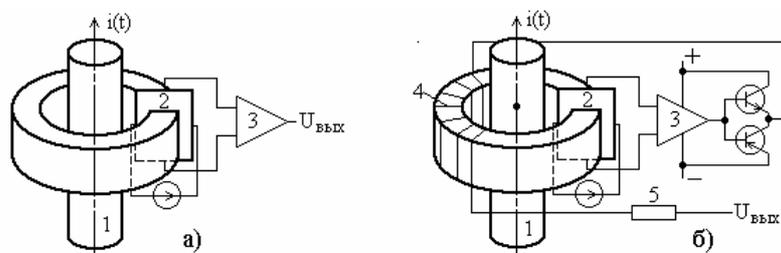


Рис. 6. Преобразователи тока на эффекте Холла разомкнутого и замкнутого типа

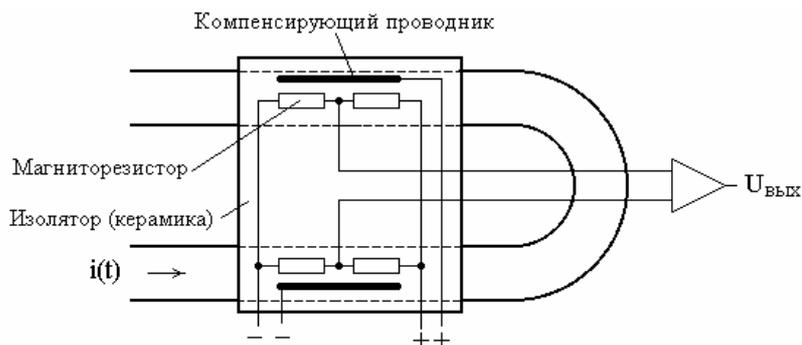


Рис. 7. Магниторезистивный преобразователь тока

По сравнению с резистивными датчиками тока, приборы на основе ячейки Холла имеют более узкий частотный диапазон, паразитное напряжение смещения (в некоторых конструкциях), низкую точность, высокую стоимость и требуют для работы внешний источник питания.

Достоинства [15]: высокая точность, возможность измерять постоянную составляющую, миниатюрность — присущи измерительным преобразователям тока (ИПТ) на основе эффекта Холла. Такие ИПТ находят широкое применение в силовой электронике и в системах управления электроприводами. Но применительно к высоковольтным цепям их основное достоинство — миниатюрность — исчезает: магнитный концентратор, в воздушный зазор которого помещается измерительный преобразователь напряженности магнитного поля, созданного измеряемым током, должен иметь большой диаметр, чтобы обеспечивать необходимое расстояние концентратора от высоковольтного проводника с измеряемым током. Второй недостаток ИПТ на основе эффекта Холла — это необходимость подключения указанного измерительного преобразователя к стабильному источнику постоянного тока [17–20].

Магниторезистивные преобразователи. Магниторезистивный эффект Гаусса заключается в изменении удельного сопротивления полупроводниковых материалов в магнитном поле. Если прямоугольную пластину из проводника или полупроводника поместить в магнитное поле и пропустить по ней электрический ток, направление которого перпендикулярно вектору индукции магнитного поля, то омическое сопротивление пластины возрастает. Это явление называют поперечным эффектом Гаусса. Если магнитное поле направлено параллельно направлению тока, то наблюдается продольный эффект Гаусса. Следует отметить, что при продольном эффекте изменение сопротивления незначительно, поэтому он не получил большого применения.

Зависимость удельного сопротивления полупроводника под действием магнитного поля можно описать уравнением (4)

$$\rho \cdot V = \rho_0 \cdot (1 + AB^2/1 + \mu^2 B), \quad (4)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при $B=0$; A — постоянная.

Из формулы (4) следует, что при малых B ($\mu B \ll 1$) удельное сопротивление ρ квадратично зависит от индукции B , а при больших значениях индукции удельное сопротивление достигает насыщения. Приближенно изменение удельного сопротивления от магнитной индукции B можно определить по уравнению (5)

$$\rho(B) = \rho_0 [1 + (\mu B)^n], \quad (5)$$

где $n = (1-2)$ — в зависимости от величины (μB).

Магниторезистивный эффект зависит также от направления магнитного поля и размеров образца. Эффект наиболее ярко выражен у пластин, имеющих форму диска Корбино, а также у некоторых сложных конфигураций.

Магниторезистивные преобразователи способны обеспечить точность и линейность до 0,1 ... 0,2 % при измерении постоянных и переменных токов до 200 А при частотах до 500 кГц и не вносят потерь [9]. Однако для их реализации требуется внешний источник, при этом они подвержены влиянию внешних магнитных полей. Последняя проблема в значительной мере снимается применением последовательно соединенных пар магниторезисторов, расположенных встречно по отношению к внешнему магнитному полю. Приемлемая температурная стабильность и помехоустойчивость достигается путем соединения магниторезисторов в преобразователе в мостовую схему, как показано на рис. 7.

Дополнительные преимущества магниторезистивных преобразователей тока заключаются в значи-

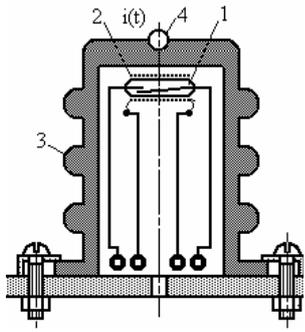


Рис. 8. Конструктивные особенности токовой защиты на герконе

тельно меньших размерах и весе, а также в существенно более высокой чувствительности по сравнению с преобразователями Холла и трансформаторами тока, отсутствие остаточной намагниченности после перегрузки, широкий частотный диапазон благодаря низкой индуктивности магниторезисторов.

Следует также добавить, что магниторезисторы и магнитодиоды не нашли широкого применения для измерения токов, так как первые реагируют на модуль магнитного поля, а вторые имеют нелинейности, существенно ограничивающие область применения.

Магнитоуправляемые контакты, или герконы представляют собой особый вид преобразователей тока, так как выполняют функцию измерительного аналого-дискретного преобразователя. Обычно герконы выполняют в виде заполненного инертным газом стеклянного баллона с впаянными в него ферромагнитными контактами [11]. Принцип управления током, протекающим по шине, как показано на рис. 8, где представлена конструкция максимальной токовой защиты на герконе (МТЗГ), которая разработана на кафедре «Электроэнергетика» в Павлодарском государственном университете для установки ее в ячейке комплектного распределительного устройства (КРУ) на рабочем напряжении 6–10 кВ [21].

В этой защите преобразователь тока выполнен в виде геркона 1 с обмоткой 2, которые закреплены внутри опорного изолятора 3. Этим обеспечивается защита геркона 1 и обмотки от высокого напряжения в проводнике с контролируемым током $i(t)$. Использование опорного изолятора 3 позволяет располагать геркон в непосредственной близости от токоведущего провода и снизить нижний уровень тока срабатывания этого геркона.

Расширить область рабочих токов преобразователей тока на герконах можно за счет использования герконов с более низкой напряженностью магнитного поля срабатывания, а также путем подмагничивания геркона постоянным магнитом [22] или с помощью обмотки, подключаемой к источнику тока.

Недостатками герконов являются: получение информации в дискретной форме; изменение электро-механических характеристик в процессе эксплуатации в среде переменных магнитных полей; наличие нижнего порога срабатывания и значительный разброс характеристик, сопоставимый с разбросом характеристик с полупроводниковыми элементами.

Выводы. Окончательный выбор типа измерительного преобразователя для реализации того или иного устройства защиты электроустановок основывается на его возможности использования, точности измерений и стоимости.

Библиографический список

- Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем / А. М. Федосеев. — М. : Энергия, 1976. — 559 с.
- Беркович, М. А. Основы техники релейных защит / М. А. Беркович, В. В. Молчанов, В. А. Семенов. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 232 с.
- Юренков, В. Д. Трансформаторы тока антенного типа / В. Д. Юренков // Труды ВНИИЭ. — 1965. — Вып. 20. — 152 с.
- Казанский, В. Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты / В. Е. Казанский. — М. : Энергия, 1969. — 184 с.
- Stein, L. В. Новое устройство для измерения тока / L. В. Stein // Энергетические системы и электротехническое оборудование. — М. : Госэнергоиздат, 1963. — № 65. — 356 с.
- Сирота, И. М. Схемы индукционного измерения тока в трехфазных цепях высокого напряжения / И. М. Сирота // Электричество. — 1967. — № 4. — С. 22–24.
- А. с. 186027 СССН, МПК G01г. Дифференциальный датчик для измерения тока / В. Е. Казанский, А. П. Кузнецов. — №908295/24-7; заявл. 25.06.1964; опубл. 12.09.1966, Бюл. № 13.
- Бинс, К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. — М. : Энергия. — 1970. — 376 с.
- Данилов, А. Современные промышленные датчики тока / А. Данилов // Современная электроника. — 2004. — № 10. — С. 26–35.
- Силаев, Ю. М. Способы и средства поиска повреждений в электросетях 6–35 кВ / Ю. М. Силаев. — М. : Информ-энерго. — 1973. — 32 с.
- Карабанов, С. М. Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе / С. М. Карабанов, Р. М. Майзельс, В. Н. Шоффа. — Долгопрудный : Интеллект, 2011. — 408 с.
- Чекмарев, А. Датчики тока и напряжения АВВ. От печатной платы до преобразователей-гигантов / А. Чекмарев // Силовая электроника. — 2006. — № 3. — С. 56–57.
- Гуртовцев, А. Л. Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Принципы работы, устройство, характеристики / А. Л. Гуртовцев // Новости электротехники. — 2009. — № 5. — С. 36–38.
- Ричардс, С. (AREVA T&D, Великобритания), Д. Шатрефу (AREVA T&D, Франция), Д. Толомье (AREVA T&D, Канада), Ф. Жиль (AREVA T&D, Франция). Нетрадиционные решения по измерительным трансформаторам — практика применения шин обработки данных IEC 61850-9.2 // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 7–10 сентября 2009 г. — М. : Науч.-инж. информ. агентство, 2009. — С. 282–291.
- Кувшинов, Г. Е. Современные направления развития измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики : моногр. / Г. Е. Кувшинов, Д. Б. Соловьев. — Владивосток : РИО Владивосток. фил. Рос. таможен. акад., 2012. — 316 с.
- Лебедев, В. Д. Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики / В. Д. Лебедев, Г. А. Филатова, А. Е. Нестерихин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : тез. докл. — Екатеринбург, 3–7 июня 2013 г. — М. : Изд-во РНК СИГРЭ, 2013. — С. 180–182.
- Модули LEM для измерения токов : рекламный проспект // Радио. — 1997. — № 1. — С. 79.
- Датчики измерения тока ДИТ-500, 750 и ДТХ-1000, 1500. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 46.ПИГН.411521.003 ТО. — Истра : НИИЭМ, 2000. — 4 с.
- Кувшинов Г. Е. Современные направления развития измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики : моногр. / Г. Е. Кувшинов, Д. Б. Соловьев. — Владивосток : РИО Владивосток. фил. Рос. таможен. акад., 2012. — С. 316.

20. Официальный сайт компании Siemens. — Режим доступа : www.siemens.com (дата обращения: 17.03.2016).

21. Новожилов, Т. А. Максимальная токовая защита на герконе / Т. А. Новожилов, А. Н. Новожилов, А. П. Попов, Н. В. Малинин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины, технологии. — 2015. — № 3 (143). — С. 251–253.

22. Новожилов, Т. А. Чувствительная защита от замыканий ТТНП с герконом / К. И. Никитин, А. Н. Новожилов, Д. А. Кудобаев, Т. А. Новожилов, О. А. Сидоров // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины, технологии. — 2013. — № 2 (120). — С. 210–213.

НОВОЖИЛОВ Тимофей Александрович, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

НОВОЖИЛОВ Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор (Республика Казахстан), профессор кафедры «Электроэнергетика» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова (ПГУ), Республика Казахстан.

ЛЯШКОВ Алексей Ануфриевич, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Инженерная геометрия и САПР» ОмГТУ.

ВОЛГИНА Екатерина Михайловна, ассистент кафедры «Электроэнергетика» ПГУ.

Адрес для переписки: timokvey@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.03.2016 г.

© Т. А. Новожилов, А. Н. Новожилов, А. А. Ляшков, Е. М. Волгина

УДК 621.382

**Д. Н. ШЕЛКОВНИКОВ
Н. Д. ШЕЛКОВНИКОВ
А. В. БУБНОВ**

Омский государственный
технический университет

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ОТ СНЕЖНО-ЛЕДОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Предложен способ раннего обнаружения и удаления гололедных образований с проводов линий электропередачи, при котором после воздействия на них высокочастотного тока ($f=0,15$ МГц), в результате проявления скин-эффекта формируется талая прослойка между проводом и гололедной муфтой, а при последующем воздействии термодинамического удара ледяная муфта легко отслаивается от провода и удаляется.

Ключевые слова: линия электропередачи (ЛЭП), плавление гололедных образований на ЛЭП, диагностика ЛЭП.

Энергетики рассматривают обледенение ЛЭП в качестве одного из опасных бедствий. В настоящее время все энергетические сетевые компании для защиты высоковольтных линий электропередачи от гололедных образований используют только метод плавки гололеда постоянным или переменным токами. Известно, что этот метод является одним из опасных мероприятий для исполнителей работ и случайных людей окружения. Этот технологический процесс плавки гололеда предусматривает предварительные отключения электроэнергии от всех ее потребителей. А это значит, что по причине вынужденного отключения электроэнергии от потребителей нарушается вся инфраструктура жизнеобеспечения населения, т.е. нарушаются условия обеспечения безопасности. Тем более именно сегодня назрела актуальная проблема создания автоматизированной системы защиты линий электропередач, в которой предупредительные меры по предотвращению гололедных образований на воздушных линиях становятся еще более актуальными. К таким мерам отно-

сится процедура раннего обнаружения гололедных образований на проводах линий электропередачи.

Целью данной научной работы является определение способа раннего обнаружения гололедных образований, который должен быть надежным, оперативным, дистанционным, не требовать наличия телемеханического канала для передачи данных на диспетчерский пункт и позволять автоматизировать процесс обнаружения появления гололеда на проводах электролинии и своевременного его удаления, не прерывая подачи электроэнергии потребителям. При этом процесс слежения за появлением гололеда на проводах электролинии и его удаления должен быть максимально автоматизированным с исключением аварийного состояния по вине «человеческого фактора».

Для удаления снежно-ледового образования с проводов предлагается устройство [1], в котором в результате скин-эффекта формируется талая прослойка между проводом и гололедной муфтой. Затем в линию автоматически подается мощный импульс

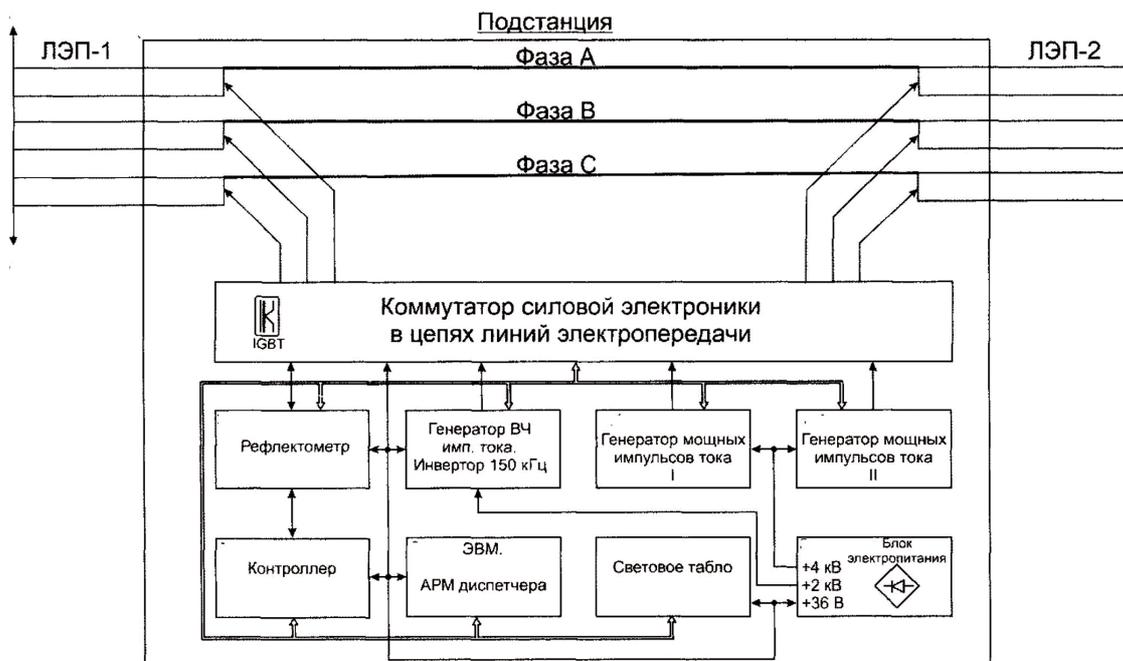


Рис. 1. Функциональная схема устройства для автоматизированного удаления снежно-ледового образования с проводов линий электропередачи (на примере двух ЛЭП)

тока для формирования термодинамического удара [2], в результате действия которого ледяная муфта легко отслаивается от провода и удаляется. Данный процесс по времени занимает не более 4–5 секунд. Удаление гололедных образований с линий электропередачи (ЛЭП) осуществляется с использованием способа разогревания проводов путем подачи на них напряжения высокой частоты, отличительной характеристикой которого является возникновение скин-эффекта. Известно, что в однородном проводнике переменный ток высокой частоты, в отличие от постоянного, не распределяется равномерно по сечению проводника, а концентрируется на его поверхности, занимая очень тонкий слой [3].

Предлагается для реализации перспективные способ и устройство для удаления снежно-ледового образования с проводов линий электропередачи (рис. 1). Данное устройство включает в себя управляемый гальванически развязанный генератор мощных импульсов тока [4], подключенный посредством импульсных трансформаторов в провода соответствующей расщепленной фазы линий электропередачи. Устройство отличается от аналогичных тем, что оно содержит подстанцию, а также объединенные в локальную сеть рефлектометр, генератор ВЧ импульсов тока, управляемые, гальванически развязанные генераторы мощных импульсов тока, общее количество которых соответствует числу контролируемых ЛЭП, соединенные с коммутатором силовой электроники, обеспечивающим подключение в соответствующие расщепленные фазы линий электропередачи, а также контроллер, связанный с рефлектометром, автоматизированное рабочее место диспетчера с ЭВМ, световое табло и блок электропитания.

Устройство работает следующим образом.

Импульсный рефлектометр осуществляет в штатном режиме круглосуточное, последовательное во времени зондирование всех контролируемых линий электропередачи с целью выявления на них гололедных образований. При обнаружении гололедных образований на любой контролируемой линии электропередачи контроллер формирует и передает

по локальной сети команду на включение генератора ВЧ импульсов тока для подачи от него высокочастотного напряжения через коммутатор силовой электроники в данную линию расщепленной фазы для ее предварительного, по правилу скин-эффекта, разогревания и формирования талой прослойки между проводом и ледяной муфтой.

Далее, по команде от контроллера, включается соответствующий генератор мощных импульсов тока для формирования термодинамического удара, который вместе с предварительно подогретой прослойкой между проводом и ледяной муфтой, осуществляет сброс гололедных образований с линии электропередачи.

Автоматизированное рабочее место диспетчера обеспечивает бесперебойную работу подстанции с отображением оперативной информации на световом табло.

Для получения мощных источников энергии с целевым применением их в системах защиты ЛЭП от гололедных образований предложена схема преобразователя энергии с дозирующим последовательным резонансным контуром (ДПК) (рис. 2). Сущность преобразования состоит в том, что из сетевого напряжения или напряжения от дизель-генератора ADV-320 выпрямленное напряжение через выпрямитель поступает на инвертор, в котором напряжение усиливается и преобразуется в симметричную прямоугольную форму типа «Меандр» без постоянной составляющей. Далее через резонансный контур L_K и C_K усиленное напряжение дополнительно усиливается высоковольтным трансформатором T_B и поступает в блок электропитания на частоте 150 кГц для дальнейшей коммутации по назначению. Это же напряжение частотой 150 кГц после выпрямителя В2 используется для зарядки накопительного конденсатора C_H для формирования мощных импульсов тока.

Таким образом, предлагаемое устройство повышает эффективность защиты ЛЭП от гололедных образований за счет своевременного оповещения о возможной аварийной ситуации и автоматизации удаления снежно-ледового образования с проводов

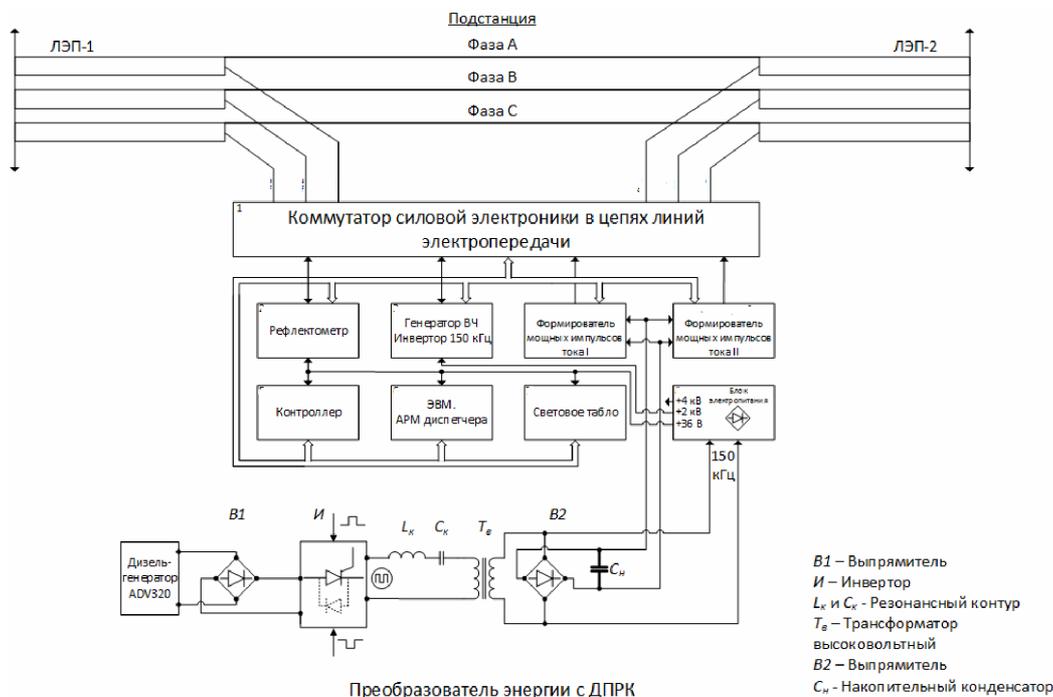


Рис. 2. Аппаратурный комплекс мобильного варианта с преобразователем энергии ДПРК для удаления гололедных образований с высоковольтных линий электропередачи

линии электропередачи. Общие затраты времени на удаление гололедных образований с каждой линии электропередачи не превышают 6 секунд. При этом исключается «человеческий фактор» в аварийной ситуации и обеспечивается бесперебойная подача электроэнергии потребителям.

Предложена для реализации схема мобильного варианта аппаратного комплекса с преобразователем энергии ДПРК для удаления гололедных образований с проводов ЛЭП.

Аппаратурный комплекс содержит блок электропитания, включающий в себя три источника постоянного тока. Один из них (+4 кВ), параллельно подключен к генераторам мощных импульсов тока; второй источник ВЧ сигналов (2 кВ), подключен к генератору ВЧ импульсов тока; к третьему источнику постоянного тока (+36 В) параллельно подключены коммутатор силовой электроники, рефлектометр, контроллер, АРМ диспетчера в составе с ЭВМ, световое табло и генератор ВЧ импульсов тока.

Аппаратурный комплекс работает по следующему алгоритму: импульсный рефлектометр осуществляет в штатном режиме круглосуточное последовательное во времени зондирование всех контролируемых линий электропередачи с целью выявления на них гололедных образований. Принцип действия рефлектометра заключается в подаче импульсного сигнала в контролируемую линию электропередачи и определении суммарного времени, затраченного на его распространение в прямом и обратном направлении после отражения от конца линии. Поскольку гололедные образования представляют собой неоднородный диэлектрик, который уменьшает скорость распространения сигнала, то по результатам сравнения измеренных рефлектограмм с эталонной определяются параметры гололедной муфты и место ее расположения вдоль контролируемой линии электропередачи.

При обнаружении гололедных образований на любой контролируемой линии электропередачи,

контроллер формирует и передает по локальной сети команду на включение генератора ВЧ импульсов тока для подачи от него высокочастотного напряжения через коммутатор силовой электроники в данную линию расщепленной фазы для ее предварительного разогревания по правилу скин-эффекта и формирования талой прослойки между проводом и ледяной муфтой. После завершения предварительного разогревания проводов расщепленной фазы автоматически, по команде от контроллера, включается соответствующий генератор мощных импульсов тока, от которого передаваемый мощный импульс через посредство коммутатора силовой электроники поступает в контролируемую линию электропередачи. В результате воздействия на данную линию расщепленной фазы мощного импульса тока формируется термодинамический удар, который в совокупности с предварительно подогретой прослойкой между проводом и ледяной муфтой осуществляет удаление гололедных образований с линии электропередачи. Общие временные затраты на этот процесс удаления гололедных образований не превышает 5–6 секунд.

Автоматизированное рабочее место диспетчера обеспечивает бесперебойную работу подстанции с отображением оперативной информации на световом табло 7.

По завершении удаления гололедных образований с линии электропередачи автоматизированное устройство переходит в штатный режим непрерывного мониторинга всех ЛЭП.

Заключение. Таким образом, предлагаемое устройство и реализованный на его основе мобильный комплекс повышают эффективность защиты ЛЭП от гололедных образований за счет своевременного оповещения о возможной аварийной ситуации и автоматического удаления снежно-ледового образования с проводов линии электропередачи.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Предложенная для реализации система автоматизированного мониторинга и диагностики линий электропередачи позволяет полностью исключить аварийные ситуации по вине «человеческого фактора».

2. Предложенная для реализации система автоматизированной защиты линии электропередач предусматривает также и гарантированную защиту служебных каналов связи, в том числе каналов релейной автоматики, а также защиту и контроль исправности линий электропередач, находящихся в резерве (в нерабочем состоянии).

Библиографический список

1. Пат. 2520581 РФ, МПК H02G 7/16. Устройство для удаления снежно-ледового покрытия с проводов линий электропередач / Шелковников Н. Д., Шелковников Д. Н. ; заявитель и патентообладатель Н. Д. Шелковников, Д. Н. Шелковников. – № 2012155399/07 ; заявл. 19.12.2012 ; опубл. 28. 04.2014, Бюл. № 18.

2. Пат. 2404497 РФ, МПК H02G 7/16. Способ для удаления снежно-ледового покрова с проводов линий электропередач / Шелковников Н. Д., Шелковников Д. Н. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Омский государственный технический

университет». – № 2009111643/07 ; заявл. 30.03.2009 ; опубл. 20.11.2010 г., Бюл. № 32.

3. Шелковников, Н. Д. Способ и устройство автоматизированной защиты ЛЭП от снежно-ледового покрытия / Н. Д. Шелковников, Д. Н. Шелковников // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2011. – № 1 (97). – С. 130 – 134.

4. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и микросхемотехника / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – М., Высшая школа, 2002. – 384 с.

ШЕЛКОВНИКОВ Дмитрий Николаевич, соискатель по кафедре «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ); региональный представитель НОУ ВПО «Сибирский институт бизнеса и информационных технологий».

ШЕЛКОВНИКОВ Николай Дмитриевич, кандидат технических наук.

Адрес для переписки: hirurg-37@mail.ru

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника» ОмГТУ.

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

Статья поступила в редакцию 16.03.2106 г.

© Д. Н. Шелковников, Н. Д. Шелковников, А. В. Бубнов

Книжная полка

Расчет тепловых процессов и установок в примерах и задачах : практикум / В. В. Шалай [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 119 с.

Практикум разработан в соответствии с рабочими программами по дисциплинам «Теоретические основы теплотехники», «Топливо и теория горения» и «Котельные установки и парогенераторы» для теоретического изучения особенностей расчета теплообменных поверхностей котельных установок. Содержит краткие сведения по проведению теплового и конструктивного расчета конвективных поверхностей с учетом геометрических особенностей, примеры расчета и задания к выполнению практических работ. Предназначен для студентов теплотехнических специальностей по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Михайлов, А. Г. Теоретические основы теплотехники : учеб. текстовое электрон. изд. локального распространения : практикум / А. Г. Михайлов, П. А. Батраков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Приведены задачи, примеры и методы их решения, лаконично и последовательно изложены теоретические основы теплотехники, знание которых необходимо для решения задач прикладной теплотехники. Практикум предназначен студентам энергетических направлений подготовки: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 13.03.03 «Энергетическое машиностроение».

Парамонов, А. М. Технологические энергоносители предприятий. Расчет и выбор оборудования систем производства сжатого воздуха : учеб. текстовое электрон. изд. локального распространения : учеб. пособие/ А. М. Парамонов. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).

Изложены методы конструктивного расчета воздушных компрессорных станций для снабжения технологических процессов сжатым воздухом. Даны примеры расчета оборудования компрессорной станции. Приведены краткие рекомендации по выполнению разделов курсового проекта и задания для его выполнения по вариантам. Предназначено для студентов дневной, заочной и дистанционной форм обучения направления подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника», профилей «Промышленная теплоэнергетика» и «Тепловые электрические станции».