

ISSN 0013-5860



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
12 2008



МЕДАЛЬ
"ЗА ЗАСЛУГИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ –
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издаётся с января 1930 года

У Ч Р Е Д И Т Е Л И

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

С О В Е Т У Ч Р Е Д И Т Е Л Е Й

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., НАЙМУШИН В.Г.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

БЕЛКИН Г.С., БЕСПАЛОВ В.Я., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., ЕВСЕЕВ Ю.А.,
ИНЬКОВ Ю.М., КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П., ЛАЗАРЕВ Г.Б., ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,
МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А., ПАНИБРАТЕЦ А.Н., РОЗАНОВ Ю.К.,
СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТУБИС Я.Б.

Содержание журнала можно бесплатно получить в
INTERNET через службу ИНФОМАГ, организован-
ную в Московском физико-техническом институте.
Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>

Журнал переводится на английский язык в полном
объёме и выходит в США в издательстве "ALLERTON
PRESS, INC" (18 West 27th Street New York N.Y. 10001).

Подписаться на журнал можно в почтовых
отделениях связи по объединённому каталогу
Департамента почтовой связи. Подписной индекс
— 71111.

В редакции можно подписаться на журнал с любого
месяца и приобрести отдельные номера за
прошлые и нынешний годы.

При перепечатке ссылка на журнал
«Электротехника» обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой
зрения авторов статей.
За содержание рекламных материалов редакция
ответственности не несёт.
Рукописи статей не возвращаются.

Издатель: **ЗАО "Знак"** 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (095) 361-95-96
E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Редактор З.П. Фёдорова
Компьютерная вёрстка Н.Н. Мерзляков

Сдано в набор 10.10.2008. Подписано в печать 20.11.2008. Формат 60x88 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ **249**.

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный 01330.

Отпечатано в ПЦ МЭИ
111250, Москва, Красноказарменная ул., 13

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Петров А.Е. Тензорный метод и двойственные сети в электротехнике. 2
- Черевко А.И., Музыка М.М. Исследование влияния управляемых выпрямителей с трансформаторами вращающегося магнитного поля на питающую сеть 13
- Минуллин Р.Г., Петрушенко Ю.Я., Фардиев И.Ш., Лукин Э.И., Лукина Г.В. Обнаружение локационным методом однофазных замыканий проводов линий электропередачи на землю. 20

- Аракелян В.Г. Практическая физико-химическая диагностика МНО в простейшей системе мониторинга. 29

- Брадаи Р., Шетат Б., Ладыгин А.Н. Повышения эффективности регулятора скорости частотно-регулируемого асинхронного электропривода средствами искусственного интеллекта 41

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

- Абдуллаев Я.Р. Оптимизация левитационного экрана электромеханического преобразователя усилий 51

- Щербakov Г.Н., Шлыков Ю.А., Бровин А.В., Усманов Р.И. Энергетические соотношения при использовании эффекта электрогидравлического удара в борьбе с подводным терроризмом 59

- Список статей, опубликованных в журнале «Электротехника» в 2008 г. 63

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

- Шамов А.Н. 68

- Шакарян Ю.Г. 3-я стр обл.

CONTENTS

SCIENTIFIC RESEARCH

- Petrov A.E. Tensor method and dual networks in the electric engineer 2
- Cherevko A.I., Muzyka M.M. Research of influence of controlled rectifiers with transformers of a rotating magnetic field on characteristics of circuits of a source 13
- Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiyev I.Sh., Lukin E.I., Lukina G.V. The detection of monophasе short-cuts on earth in electricity transmission lines by location method 20

- Arakelyan V.G. The practical physicochemical diagnostics of oil-filled equipment 29

- Bradai R., Chetate B., Ladygin A.N. Application of artificial intelligence resources for increase speed controller efficiency in vector induction machine drive 41

ELECTRICS APPARATUSES

- Ablullayev Ya.R. Optimization levitation the screen electromechanical the converter of efforts 51

- Scherbakov G.N., Shlykov Y.A., Brovin A.V., Usmanov R.I. Energy ratio while using effect of electrohydraulic knock in the struggle with submerged terrorism 59

- The list of the articles that were published in journal "Electrotechnics" in 2008 63

OUR JUBILARY

- Chamov A.N. 68

- Chakaryan Y.G. 3p. of cover

Тензорный метод и двойственные сети в электротехнике¹

ПЕТРОВ А.Е.

Развитие тензорного метода Крона на основе инварианта двойственности даёт закон сохранения потока энергии и методы расчёта цепей и сетевых моделей сложных систем с переменной структурой, включая электрические модели экономических систем.

Ключевые слова: тензорный метод, двойственность, электротехника

Существует проблема отражения реальности человеком для анализа, исследования и, в конечном счёте, развития жизни. Для этого вводят системы отсчёта координат, в которых числа отражают математическую «тень» реальности. При изменении координат меняются числа (компоненты, проекции), но не сама реальность. Хотя сама независимость объекта наблюдения от наблюдателя является одной из проблем измерений.

В математике ввели цилиндрические, сферические, криволинейные системы координат, в которых один объект имеет разные компоненты. Выбираемые контуры и пары узлов представляют электрические процессы в цепях. Вращающиеся системы координат связаны с ротором электрической машины. В экономике реальные потоки продуктов и денежных средств отражают в разных системах отчётности (планы счетов, вводимые международные стандарты финансовой отчётности, МСФО и т.д.). Понятию реального, измеримого объекта в математике соответствует понятие тензора.

Начиная с середины XIX в. тензоры стали использовать в механике при описании упругих деформаций. Первоначально тензорный анализ называли «абсолютное исчисление». Г. Риччи и Т. Леви-Чивита рассматривали тензорное исчисление как составную часть дифференциальной геометрии. Термин «тен-

Kron tensor method development, based on dual invariance, provide flow energy conservation law and calculation methods of circuits and complex systems with variable structure network models, including electrical models of economic systems.

Key words: tensor metod, dual invariance, electrical engineering

зор» ввел В. Фойгт в 1898 г., хотя некоторые приписывают это А. Эйнштейну. Тензоры в электротехнике начал применять Г. Крон.

Суть тензорного метода состоит в признании инвариантности объекта в пространстве (вектора, многомерного объёма в геометрии; измеримой величины в физике, технике или экономике). Реальный объект существует независимо от субъективных систем координат наблюдателя, в которых объект представлен компонентами (измерен). Если компоненты при изменении координат преобразуются по линейным законам (матрицей преобразования базиса), то это признак измеримости объекта, который является тензором. Если тензор имеет ненулевые компоненты в одной системе координат, то он имеет ненулевые компоненты в любой системе координат. И, наоборот, если тензор имеет нулевые компоненты в одной системе координат, то он имеет нулевые компоненты в любой системе координат, т.е. реальный объект не исчезает при изменении координат и не возникает из ничего.

Обобщением понятия тензора является абстрактная система для процессов и структуры одного типа, а конкретные системы рассматриваются как её «проекции» в координаты, заданные структурой связей. Это позволяет создать математические сетевые модели в разных предметных областях.

Применение тензорного метода к исследованию сложных систем началось с электрических машин, которые считались столь сложными системами, что для каждого типа

¹ Исследования по сетевому моделированию экономических систем проведены при поддержке РФФИ, проект 07-06-00209.

создавалась своя теория (а порой и несколько). Основателем обобщённой теории электрических машин является Г. Крон, который в 30-х годах прошлого века предложил уравнения обобщённой машины. В последние десятилетия благодаря применению ЭВМ усилиями многих учёных-электромехаников обобщённая теория электрических машин получила дальнейшее развитие. Большинство успехов в теории и практике электромашиностроения связано с математической теорией электрических машин» [1].

Обобщённая электрическая машина Крона в минимальной форме реализует процесс электромеханического преобразования потока энергии. Другие электрические машины отличаются от обобщённой машины количеством элементов, осуществляющих этот процесс, и числом связей между ними. Переход от одной машины к другой задаёт матрица преобразования, которая показывает, как отличаются структуры соединения машин.

В [2] все электрические машины, которые до этого считались несопоставимыми, исследованы с единой точки зрения построения диаграмм, которые показывают значение и направление потоков энергии между различными частями сложной машины. Для этого было применено понятие «свободная энергия» из термодинамики.

Основы тензорной теории электрических машин представлены в [3]. В 60-х годах в трудах Японской ассоциации прикладной геометрии данная статья охарактеризована как «сделавшая эпоху». Было введено понятие простейшей (обобщённой) электрической машины из двух элементов — обмоток. Уравнения поведения обобщённой машины Крон получил из уравнений Лагранжа. Тогда уравнения любой машины с другим числом и соединением элементов получаются умножением величин в уравнениях простейшей системы координат (обобщённой машины) на матрицу преобразования C , которая показывает, как соединены обмотки в исследуемой машине. Оказалось, что уравнения электрических машин при стационарном режиме имеют такой же вид, как для неподвижных сетей, при условии, что обычное дифференцирование в уравнении

$$e_{\alpha} = R_{\alpha\beta} i^{\beta} + \frac{d\varphi_{\alpha}}{dt} \quad (1)$$

заменяется ковариантным дифференцированием δ/dt , при котором учитывается изменение векто-

ра при его параллельном переносе вдоль кривой в римановом пространстве:

$$e_{\alpha} = R_{\alpha\beta} i^{\beta} + \frac{d\varphi_{\alpha}}{dt}, \quad (2)$$

где e — напряжение; R — сопротивление (резистанс); i — ток; φ — магнитный поток; t — время, а $\delta\varphi_{\alpha}/dt$ — ковариантная производная, учитывающая изменение вектора при параллельном переносе в криволинейном римановом пространстве.

При малых колебаниях около стационарного вращения — качаниях, это уравнение принимает вид:

$$\delta e_{\alpha} = R_{\alpha\beta} \delta i^{\beta} + L_{\alpha\beta} \frac{\delta(\delta i^{\beta})}{dt} + K_{\delta\gamma\beta\alpha} i^{\delta} i^{\beta} dx + R_{\alpha\beta\gamma} i^{\beta} dx^{\gamma}, \quad (3)$$

где $R_{\alpha\beta\gamma}$ — тензор 3-го ранга, определяемый сопротивлениями; $K_{\delta\gamma\beta\alpha}$ — тензор кривизны Римана — Кристоффеля, наличие которого показывает, что поведение вращающейся электрической машины в режиме качания описывается как движение представляющей точки в неримановом пространстве с асимметричной связью (с кручением).

Форма уравнений для стационарного режима, ускорения и качаний остается *одна и та же*, но само пространство усложняется за счёт всё большего искривления. Искривление пространства, представляющего поведение машины, подобно искривлению физического пространства вблизи тяготеющей массы, которое отклоняет луч света (поток фотонов), проходящий мимо поля солнечного тяготения. А. Эйнштейн считал, что Крон распространил в область техники идеи общей теории относительности. Н. Винер отметил, что Крон ввёл новый язык, который позволяет не только поставить задачи расчёта машин единым образом, но и дать новые методы решения таких задач [4].

Крон исследовал преобразования токов и напряжений при изменении соединения ветвей в цепи (circuit — этот термин Крон использовал наряду с термином «сеть» — network). Для этого он ввёл понятие *простейшей* (из отдельных ветвей) сети. Другие сети из данных ветвей — это варианты соединений ветвей простейшей сети [5]. Для получения уравнений *соединённой* сети из уравнений простейшей сети использовались матрицы преобразования, которые связывают токи в контурах простейшей сети с токами в кон-

турах соединённой сети (или напряжения на свободных ветвях с напряжениями в разомкнутых путях связанной сети). Они представляют матричную запись законов Кирхгофа.

Крон утверждал, что при соединении ветвей рассеиваемая мощность в электрической цепи не меняется, поскольку остаются прежними источники тока и напряжения, которые задают в сети поток энергии. Постулат об инварианте мощности позволял получить тензорную формулу преобразования напряжения – важнейший пункт тензорного анализа сетей. Однако известно, что *мощность меняется при изменении связей*. Доказано, что для заданной цепи, состоящей из резисторов и источников, значение напряжения на всех резисторах не выше суммы значений напряжений на источниках. Это следует из теоремы Волавера в теории графов о неусилении мощности в резистивной сети. Суть доказательства в том, что в ориентированном графе каждое ребро находится либо в ориентированном цикле, либо в ориентированном сечении, либо отсутствует в обоих.

Под расчётом цепи понимается вычисление электрических величин или их отношений при заданных схеме и параметрах цепи. В частности, задача состоит в определении *откликов* в соединённых ветвях при заданных *воздействиях* в отдельных ветвях. При этом должны выполняться законы Кирхгофа о равенстве нулю суммы токов в каждом узле и равенстве нулю суммы напряжений в каждом контуре.

Суть тензорного метода Крона в электротехнике в том, что к уравнениям процесса прохождения электрического тока добавлено описание структуры связей с помощью матриц преобразования. Токи i^α и напряжения e_α на n ветвях связаны законом Ома: $e_\alpha = z_{\alpha\beta} i^\beta$, где $z_{\alpha\beta}$ – матрица комплексных сопротивлений, которая при индуктивном взаимодействии ветвей может и не быть диагональной ($\alpha, \beta = 1, \dots, n$).

Контурный и узловый методы расчёта цепи Крон представил как преобразования тензоров в пространстве сети, где сопротивление – метрический тензор, а ток и напряжение – контравариантные и ковариантные векторы. Коэффициенты выражения токов в n свободных ветвях i^α через токи в m контурах связанной сети $i^{\alpha'}$ составят матрицу преобразования ${}^m C_{\alpha'}^\alpha$ (порядка $m \times n$):

$$i^\alpha = {}^m C_{\alpha'}^\alpha i^{\alpha'} \quad (4)$$

Строки матрицы показывают, в какие контуры входит данная ветвь, а столбцы – из каких ветвей состоит контур. Рассеиваемая мощность P равна сумме мощностей на ветвях, т.е. произведений напряжения и тока в каждой *свободной* ветви: $P = e_\alpha i^\alpha$ ($\alpha = 1, \dots, n$). Аналогично для напряжений и токов в контурах связанной сети: $P' = e_{\alpha'} i^{\alpha'}$ ($\alpha' = 1, \dots, m$), где предполагается сумма по одинаковым верхним и нижним индексам. Если *постулировать*, что мощность при изменении соединений не меняется, и подставить (4), то получим закон преобразования для напряжения:

$$e_{\alpha'} i^{\alpha'} = e_\alpha i^\alpha = e_\alpha C_{\alpha'}^\alpha i^{\alpha'}, \text{ откуда}$$

$$e_{\alpha'} = e_\alpha {}^m C_{\alpha'}^\alpha = {}^m C_{\alpha' t}^\alpha e_\alpha, \quad (5)$$

где индекс t означает транспонирование матрицы.

Чтобы получить формулу преобразования $z_{\alpha\beta}$, подставим (4) и (5) в уравнение закона Ома в матричной форме:

$$e_\alpha = z_{\alpha\beta} i^\beta = z_{\alpha\beta} {}^m C_{\beta'}^\beta i^{\beta'}, \quad (6)$$

но для этого надо в (5) сделать обратное преобразование: $e_\alpha = ({}^m C_{\alpha' t}^\alpha)^{-1} e_{\alpha'}$. Это возможно, когда сеть состоит из одних контуров ($m = n$). В этом случае матрица $C_{\alpha'}^\alpha$ квадратная и может иметь обратную матрицу. В общем случае, когда контуров меньше чем ветвей, это невозможно, поскольку матрица ${}^m C_{\alpha'}^\alpha$ прямоугольная, для неё не существует обратной матрицы. Однако если формально подставить в (6), то

$$e_\alpha = ({}^m C_{\alpha' t}^\alpha)^{-1} e_{\alpha'} = z_{\alpha\beta} {}^m C_{\alpha'}^\beta i^{\alpha'}. \quad (7)$$

Умножая обе части уравнения на матрицу $({}^m C_{\alpha'}^\alpha)_t$, получим:

$$\begin{aligned} & ({}^m C_{\alpha'}^\alpha)_t ({}^m C_{\alpha' t}^\alpha)^{-1} e_{\alpha'} = \\ & = (({}^m C_{\alpha'}^\alpha)_t z_{\alpha\beta} {}^m C_{\alpha'}^\beta)^{-1} i^{\alpha'} = e_{\alpha'}, \end{aligned} \quad (8)$$

откуда, используя постулат о том, что вид уравнений поведения не меняется при соединениях [5], получим формулу преобразования сопротивления:

$$z_{\alpha\beta} = ({}^m C_{\alpha'}^{\alpha})_t z_{\alpha\beta} {}^m C_{\beta'}^{\beta}. \quad (9)$$

В (9) нет обратных матриц преобразования, а значит, и не надо «обращать» прямоугольные матрицы. Далее расчёт производится контурным методом. Если подставить все формулы преобразования в выражение токов в ветвях связанной сети, то получим:

$$i_c^{\beta} = {}^m C_{\alpha'}^{\alpha} ({}^m C_{\alpha'}^{\alpha} z_{\alpha\beta} {}^m C_{\alpha'}^{\alpha})^{-1} {}^m C_{\alpha'}^{\alpha} e_{\alpha} = {}^m Y_c e_{\alpha}. \quad (10)$$

Матрица метрического тензора связанной сети ${}^m Y_c$ выражает токи в ветвях связанной сети через заданные источники ЭДС. Назовём её «матрицей решения».

Делая двойственные замены величин, получим формулы расчёта цепи узловым методом, при этом матрица C заменяется на ортогональную матрицу $A = C_t^{-1}$. Крон полагал, что матрица A не имеет такого структурного смысла, как матрица C . Оказалось, что матрица A имеет такой же смысл, но как матрица $\underline{C} = A$ в двойственной цепи (сети).

Обосновать постулат об инварианте мощности пытались физики, например Б. Гофман, и математики (Дж. Рот). Дискуссия по применению тензоров в технике растянулась на десятки лет, в том числе на страницах журнала «Электричество», и носила острый характер, порой выходя за рамки научной терминологии [6]. Одни применяли тензорный метод в различных областях физики и техники. Другие отвергали его за прямоугольные матрицы, которые не образуют группу. Несмотря на проблемы, «эти работы, несомненно, оказали глубокое влияние на развитие многих областей знания и способствовали прогрессу в разработке методов решения системных задач с помощью цифровых вычислительных машин» [7]. Крон писал, что чем дальше он уходил от электротехники к сетевым моделям в физике, технике, тем более точно пришлось определять основные понятия в самой электротехнике. Теперь ясно, что это общие законы структуры, которые присущи всем неживым и живым системам, от микромира до космических масштабов.

Таким образом, реально постулат Крона об инварианте мощности не выполняется, поскольку мощность при изменении связей меняется, а вывод формул тензорного анализа сетей содержит недопустимое обращение

прямоугольной матрицы. Однако его метод расчёта цепей и машин даёт правильные результаты. Получается диалектическое противоречие. Автор провёл ряд расчётов цепей при изменении структуры, пытаясь найти закономерность изменения мощности. Оказалось, что решение, в согласии с законами диалектики, лежит в другой «плоскости». Рассеиваемая мощность меняется в одной цепи при изменении связей, но постоянна в сумме цепи и цепи с двойственной структурой.

В основе постоянства мощности в физических цепях с двойственной структурой лежат абстрактные, математические свойства структуры связей. Существует фундаментальный закон двойственности структуры. Он выражается инвариантом, который связывает метрические матрицы (матрицы решения) абстрактных двойственных сетей.

В сети двойственными являются замкнутые и разомкнутые пути, воздействия и отклики, внешние и внутренние воздействия, сеть и двойственная к ней сеть (её величины обозначим подчеркиванием). Если, например, соединить две ветви, то два узла сливаются (уменьшается число узлов). Возникает новый независимый контур, растёт размерность подпространства замкнутых путей. При этом исчезает разомкнутый путь, уменьшается размерность базиса разомкнутых путей. Общая размерность пространства путей в сети не меняется, она постоянна и равна количеству элементов – ветвей, т.е. $n = m + j$.

В двойственных сетях (рис. 1) постоянны размерности подпространств замкнутых и разомкнутых путей. Замкнутому пути в сети соответствует разомкнутый путь в двойственной сети, и наоборот: $n = \underline{n}$, $m + \underline{m} = n$, $j + \underline{j} = \underline{n}$. Слиянию двух узлов в сети соответствует разделение узла на два в двойственной сети, и наоборот. Таким образом, при изменении структуры двойственных сетей общая размерность подпространств замкнутых путей остаётся постоянной; общая размерность подпространств разомкнутых путей постоянная, сумма метрических тензоров постоянна.

Если сопротивления ветвей равны единицам ($Z = Y = I$), то инвариант двойственности связывает матрицу решения сети и матрицу решения двойственной сети:

$${}^m C ({}^m C_t {}^m C)^{-1} {}^m C_t + {}^j A ({}^j A_t {}^j A)^{-1} {}^j A_t = \\ = {}^m C ({}^m C_t {}^m C)^{-1} {}^m C_t + {}^m \underline{C} ({}^m \underline{C}_t {}^m \underline{C})^{-1} {}^m \underline{C}_t = I. \quad (11)$$

В (11) ${}^m C = J \underline{A}$ – матрица преобразования замкнутых путей сети или разомкнутых путей двойственной сети; $J \underline{A} = {}^m C$ – матрица преобразования разомкнутых путей сети или замкнутых путей двойственной сети; I – единичная матрица. Это закон структуры, не связанный с материей. Сюда входят только матрицы преобразования путей.

Закон структуры проявляется в физических цепях. Если ветви сети имеют веса-сопротивления (собственные и взаимные) с матрицей сопротивлений (метрический тензор) $Z \neq I$, ($Z = Y^{-1}$), то инвариант двойственных сетей для замкнутых путей примет вид:

$${}^m C ({}^m C {}^m C {}^m C)^{-1} {}^m C {}^m C + Y {}^m C ({}^m C {}^m C {}^m C)^{-1} {}^m C {}^m C = Y = (Z)^{-1}. \quad (12)$$

Двойственная сеть

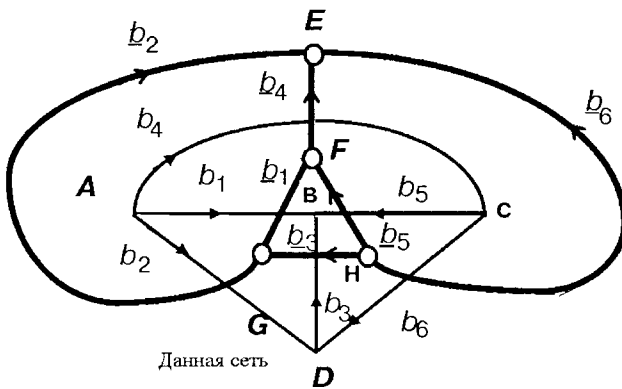


Рис. 1. Пример ориентации ветвей в двойственных сетях из 6 ветвей

Для разомкнутых путей инвариант имеет двойственный вид, с заменой C на A , Z на Y . Инвариант связывает метрические тензоры (матрицы решения) двойственных сетей (цепей). Компоненты потока энергии расположены в базисе замкнутых (внутреннее воздействие) или разомкнутых (внешнее воздействие) путей. В данном случае инвариант – это постоянство квадрата значения вектора (потока энергии): часть его расположена в сети, часть в двойственной сети, а сумма постоянна для любых соединений.

В двойственных сетях сумма токов в каждой ветви и сумма напряжений на каждой ветви постоянна. Сумма мощностей, рассеиваемых в двойственных сетях, постоянна. Сеть и двойственная сеть дополняют друг

друга, обладая полнотой единого объекта. По своей сути инвариант двойственности есть проявление закона сохранения потока энергии. Этот закон сохранения, следующий по физической размерности после закона сохранения энергии, является физико-структурным законом. Из него следует существование двойственных структур, расположенных в двойственном пространстве.

Крон был прав в том, что изменение соединений ветвей не меняет мощность источников. Однако мощность, рассеиваемая в цепи от этих источников, делится, «расщепляется» между данной и двойственной структурами. В каждой из цепей мощность меняется при изменении соединений, в том числе при соединении ветвей в цепь. Поэтому постулат об инвариантности мощности, как сформулировал его Крон, не выполняется.

Изменения структуры меняют метрические свойства сети в соответствии с инвариантом двойственных сетей. Изменения структуры состоят в изменении числа узлов. Разъединение увеличивает число узлов ($\Delta J > 0$), а соединение уменьшает число узлов ($\Delta J < 0$). При этом взаимно меняется число контуров и разомкнутых путей в двойственных сетях. Уменьшение числа узлов увеличивает число замкнутых путей (контуров), снижает число разомкнутых путей. Увеличение числа узлов повышает число разомкнутых путей, уменьшает число замкнутых путей (контуров).

Это даёт две основные формулы расчёта сети для наложения связей:

$$Y_c^{2+} = Y_c^1 + \Delta Y_c = Y_c^1 + (I - Y_c^1 Z) \Delta C_t \times [\Delta C Z (I - Y_c^1 Z) \Delta C_t]^{-1} \Delta C (I - Z Y_c^1); \quad (13)$$

$$Z_c^{2+} = Z_c^1 - \Delta Z_c = Z_c^1 - Z_c^1 \Delta C_t \times (\Delta C Z_c^1 \Delta C_t)^{-1} \Delta C Z_c^1 = Z_c^1 - Z \Delta Y_c Z. \quad (14)$$

Здесь матрицы изменения решения:

$$\Delta Y_c = (I - Y_c^1 Z) \Delta C_t \times [\Delta C Z (I - Y_c^1 Z) \Delta C_t]^{-1} \Delta C (I - Z Y_c^1); \quad (15)$$

$$\Delta Z_c = Z_c^1 \Delta C_t [\Delta C Z_c^1 \Delta C_t]^{-1} \Delta C Z_c^1, \quad (16)$$

где $Y_c^1 = {}^m C_{1t} ({}^m C_1 Z {}^m C_{1t})^{-1} {}^m C_1$ – матрица решения сети со старой структурой (замкнутые пути, внутренние источники); $Z_c^1 = {}^j A_{1t} ({}^j A_1 Y {}^j A_{1t})^{-1} {}^j A_1$ – матрица решения сети со старой структурой (разомкнутые пути, внешние источники); ΔC – матрица преобразования путей, которые меняются (замыкаются или размыкаются) при изменении структуры сети.

Варианты расчёта двойственных сетей при изменении структуры представлены в таблице. Контуры представляют базис в замкнутой сети, а разомкнутые пути – базис в открытой сети. Возможен расчёт сети при уменьшении числа узлов (наложение связей) и при увеличении числа узлов (разрывание связей).

В таблице представлена обобщённая диакоптика (метод расчёта по частям), где, в отличие от [8], даны все виды расчёта при изменении структуры, а не только разделение на части «пуассоновского» и «диффузионного» типов. Алгоритмы расчёта процессов при изменении структуры сетей и сетевых моделей сложных систем основаны на инварианте двойственности и могут применяться для решения задач электротехники. Например, для определения влияния отключения подсистем в электрических сетях в результате аварий или катастроф, или подключения подсистем, при введении новых мощностей, и т.д.

Поток энергии, численно равный мощности, рассеиваемой в сети, можно наглядно представить круговой диаграммой как красно-синий «мячик», до половины погруженный в «воду». Двойственная сеть располагается в двойственном, «параллельном» пространстве.

Площадь тёмной (красной) половины такого мячика соответствует мощности (или квадрату значения вектора) в замкнутых путях данной и двойственной сети, а площадь светлой (синей) половины – мощности в разомкнутых путях. При изменении структуры мощность в двойственных цепях меняется, что отражает изменение площадей разных цветов при вращении двухцветного мячика в «воде», где

– «воздушная» среда представляет наблюдаемое пространство;

– «водная» среда представляет двойственное пространство.

Вращение «мячика» наглядно представляет изменения мощности при изменении структуры, меняя доли красного и синего цвета над (и под) поверхностью раздела двух сред. Сумма площади красного цвета (мощность внутренних источников, т.е. источников напряжения, ЭДС) над и под поверхностью (в данной и двойственной цепи) постоянна. Сумма площади синего цвета (мощность внешних источников, т.е. тока) над и под поверхностью постоянна. Сумма площади красного и синего цвета над поверхностью, а также сумма площади красного и синего цвета под поверхностью постоянны. При изменении структуры рассеиваемая мощность меняется, но согласованно, так, что остаются постоянными четыре суммы в базисах замкнутых путей и разомкнутых путей.

Постоянство суммарной рассеиваемой мощности при изменении структуры двух двойственных цепей представляет закон сохранения потока энергии. Полная диаграмма изменения мощности при изменении структуры данной и двойственной сетей, в которых за-

Расчёт двойственных сетей при изменении структуры

Двойственность изменяемых путей $\Delta m = \Delta j = \Delta \underline{m} = \Delta \underline{j}$			
Данная сеть		Двойственная сеть	
Уменьшение числа узлов		Увеличение числа узлов	
m – контуры	$Y_c^{2+} = Y_c^1 + \Delta Y_c$	\underline{j} – разомкнутые пути	$\underline{Y}_c^{2-} = \underline{Y}_c^1 - \Delta Z_c$
j – разомкнутые пути	$Z_c^{2+} = Z_c^1 - \Delta Z_c$	\underline{m} – контуры	$\underline{Z}_c^{2-} = \underline{Z}_c^1 + \Delta Y_c$
Увеличение числа узлов		Уменьшение числа узлов	
m – контуры	$Y_c^{2-} = Y_c^1 - \Delta \underline{Z}_c$	\underline{j} – разомкнутые пути	$\underline{Y}_c^{2+} = \underline{Y}_c^1 + \Delta \underline{Y}_c$
j – разомкнутые пути	$Z_c^{2-} = Z_c^1 + \Delta \underline{Y}_c$	\underline{m} – контуры	$\underline{Z}_c^{2+} = \underline{Z}_c^1 - \Delta \underline{Z}_c$

даны источники энергии двух типов, представлена на рис. 2.

Фундаментальное значение инварианта постоянства мощности в том, что он показывает: распространение потока энергии в любых структурах (не только электрических, но и других технических, экономических, биологических) с необходимостью сопровождается потоком в двойственной структуре. Можно предположить, что такая структура расположена в *ненаблюдаемом в настоящее время* двойственном пространстве. Двойственные пространства в совокупности составляют единое пространство с не менее чем удвоенным числом измерений.

Двойственное пространство располагается везде и должно контактировать с объектами в наблюдаемом пространстве при распространении потоков энергии, проявляя себя при изменении структуры систем, по которым энергия распространяется. Это расширяет представление о физическом мире. К осознанию фундаментальной роли структурных связей движется физика, где предлагаются теория струн и другие гипотезы многомерного мира, параллельных пространств и других Вселенных. Постоянство потока энергии в двойственных структурах электрических цепях дополняет теорию об электромагнитной Вселенной И.П. Копылова.

В 40–70-е годы Крон использовал эквивалентные электрические цепи в качестве эталонной системы для моделирования физических, технических и экономических систем,

используя аналогии процессов и структуры. Были построены модели в виде эквивалентных электрических цепей для уравнений поля Максвелла, Шредингера, Навье–Стокса, модели упругих систем (строительные конструкции, разрезные диафрагмы турбин), модели электронных ламп, электрических машин, сетей передачи электроэнергии, ядерного реактора, транспортной задачи и др.[8]. Эти модели применялись для расчёта сложных систем по частям. Теперь для моделирования можно применять аппарат двойственных сетей.

Представляют интерес работы Крона по многомерным (полиэдральным) сетям. Полиэдральные сети в работах 1958–1968 гг. состоят не только из одномерных ветвей, но также из плоскостей, точек, объёмов, многомерных элементов и проводят не только электрический ток, но и потоки энергии других видов. Например, магнитные и диэлектрические силовые линии определяются через поверхностные интегралы по плоскостям графа, ограниченным контурами. Магнитный поток распространяется через двумерные поверхности (представленные обмотками в электрических машинах). Электромеханические преобразователи (электрические машины) являются простейшим примером полиэдральных сетей, в данном случае двумерных сетей.

Процессы наука изучает давно, однако свойства структуры до сих пор изучены недостаточно. Существенную роль структуры



Рис. 2. Диаграмма изменения мощности в двойственных цепях при изменении структуры

играют в экономике. Известно, что наибольший вклад в падение производства после гражданской войны внесло разрушение хозяйственных связей. После распада СССР на 15 независимых частей также была нарушена структура хозяйственных связей при сохранении природного, промышленного, человеческого потенциала. В результате, по данным ЦЭК при Правительстве РФ индекс интенсивности промышленного производства со 100% в январе 1990 г. снизился до 38% в августе 1998 г., т.е. в 2,5 раза.

Для анализа влияния структуры связей на производство автор разработал сетевую модель межотраслевого баланса, используя аналогии с электрической цепью [6, 9]. По физическому смыслу модель применима для анализа хозяйственных связей на уровне предприятий, отраслей, регионов, государств и обеспечивает расчёт производства продуктов и потребления ресурсов для вариантов управления развитием, структурных реформ, последствий разделения экономической системы на части или создании союзов и т.д.

Токи представляют потоки продуктов, а напряжения моделируют финансовые воздействия (потоки денежных средств). Это первая сетевая модель, когда живая (экономическая) система представлена неживой (технической) системой за счёт применения тензорных величин, связи процессов и структуры, инвариантов двойственности.

Отрасли (производства) выпускают продукты для удовлетворения спроса (плана) и межотраслевых поставок, потребляют ресурсы и продукцию друг друга. Задача состоит в расчёте объёма производства (валового выпуска) отраслей и ресурсов, обеспечивающих

спрос и поставки. Это определяет система уравнений:

$$X_\alpha = \sum_{\alpha=1}^n x_{\alpha\beta} + y_\alpha; X_\alpha = \sum x_{\alpha\beta} + y_\alpha, \quad (17)$$

где валовые выпуски отраслей X^α ($\alpha=1, \dots, n$) обеспечивают план y_α и поставки $x_{\alpha\beta}$. Межотраслевые поставки задают коэффициенты прямых затрат $a^{\alpha\beta}$ (количество продукта одной отрасли для производства единицы продукта другой отрасли): $x_{\alpha\beta} = a^{\alpha\beta} X_\beta$. Потребление ресурсов определяют коэффициенты $b_{\gamma\beta}$ – количество ресурса γ для производства единицы продукта отрасли β : $r_{\gamma\beta} = b_{\gamma\beta} X_\beta$.

Решение сводится к обращению экономической матрицы Леонтьева $(I - A)$. Для реальных задач порядок этой матрицы может составлять тысячи строк и столбцов, в итоге время решения превышает период планирования. Это затрудняет управление экономикой.

Сетевая модель межотраслевого баланса включает все соотношения между потоками в системе. Уравнения системы приводятся к тензорному виду, т.е. при изменении координат (структуры спроса, хозяйственных связей) все величины преобразуются линейно. На рис. 3 показан пример пяти отраслей, связанных поставками (наклонные линии), сверху поступают ресурсы, стрелки вниз показывают спроса (план).

Модель открытая, в том смысле, что любую отрасль можно перевести в разряд ресурсов (и наоборот). Можно добавить или исключить отрасли, соответственно изменится состав поставок и потребление ресурсов. Например, для расчёта агрегированной моде-

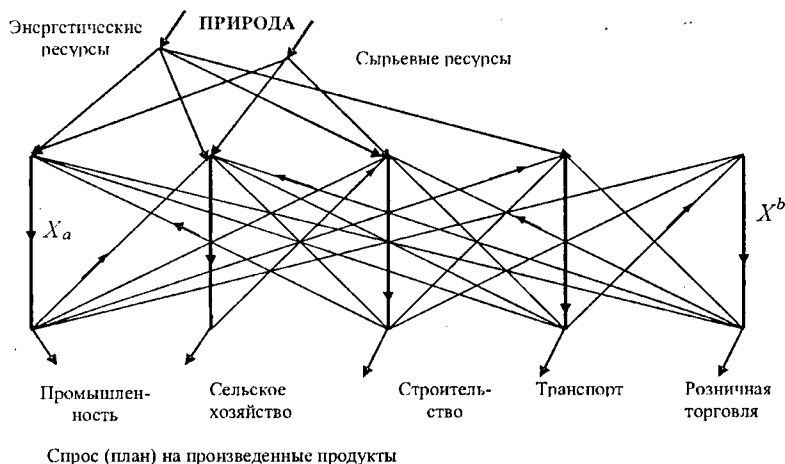


Рис. 3. Структура сети потоков продуктов в отраслях

ли региона можно ввести отрасль «прочие производства» и сохранить полноту модели.

Связь потоков продуктов в (17) записана как закон сохранения потоков в узлах на *выходе* отраслей аналогично первому закону Кирхгофа. Формулы для коэффициентов прямых затрат и ресурсов аналогичны законам Ома. На рис. 3 можно видеть, что также есть связь потоков в узлах *входов* отраслей:

$$X^\alpha = \sum x^{\alpha\beta} + \sum r^{\gamma\beta} = \sum a^{\alpha\beta} X_\beta + \sum b^{\alpha\beta} X_\beta = (\sum a^{\alpha\beta} + \sum b^{\alpha\beta}) X_\beta. \quad (18)$$

Потребление ресурсов $r^{\gamma\beta}$ и поставок $x^{\alpha\beta}$ определяется, следовательно, значением валового выпуска X_α . В (18) слева и справа стоит численно один и тот же вектор, поэтому

$$\sum a^{\alpha\beta} + \sum b^{\alpha\beta} = 1. \quad (19)$$

Физически это означает: для выпуска продукта нужны все необходимые поставки и ресурсы – условие очевидное, а потому обычно не используемое. Однако это обеспечивает полноту описания потоков в сети и позволяет привести уравнения к тензорному виду.

Если в каждой отрасли выпуск на выходе X^α равен выпуску на входе X_α , то система отраслей работает в стационарном режиме, т.е. потоки финишного продукта, поставок, ресурсов определены и постоянны. Тогда метрический тензор единичный, ($g^{\beta\alpha} = \delta^{\beta\alpha} = 1$), что в геометрии соответствует декартовым координатам.

Когда происходят изменения структуры связей, спроса, ресурсных возможностей и т.д., то система отраслей работает в переходном режиме и $X_\beta \neq X^\alpha$. Тогда метрический тензор усложняется, а системы координат становятся криволинейными. За счёт искривления пространства система настраивается на стационарный режим. На каждом этапе вычислений $X_\beta^m \neq X_m^\alpha$. Это выражает степенной ряд обращения матрицы Леонтьева:

$$X_\beta = \delta_{\beta\alpha} y^\alpha + a_{\beta\alpha} y^\alpha + (a_{\beta\alpha} y^\alpha)^2 + (a_{\beta\alpha} y^\alpha)^3 + \dots \\ \dots = X_0^\beta + X_1^\beta + X_2^\beta + X_3^\beta + \dots$$

Если первоначально предприятия стоят, а затем начинается выпуск продуктов в объёме спроса, то $X_{\alpha 0} = \delta_{\alpha\alpha} y^\alpha = y^\alpha$. Для этого нужны поставки в количестве $x_0^{\beta\alpha} = a^{\beta\alpha} X_{\beta 0} = a^{\beta\alpha} y^\alpha$. Тогда выпуск продукта возрастет до

$$X_1^\beta = y^\alpha + a^{\beta\alpha} y^\alpha = (\delta^{\beta\alpha} + a^{\beta\alpha}) y^\alpha. \quad (20)$$

При вычислении $m+1$ члена ряда $X_{(m+1)}^\beta$ на выходе отрасли уже возрастет до:

$$X_{(m+1)}^\beta = X_m^\beta + (a^{\beta\alpha})^{(m+1)} y^\alpha, \quad (21)$$

где матрица $a^{\beta\alpha}$ возводится в степень $m+1$, а поток продукта на входе $X_{\beta m} = a^{\beta\alpha} X_m^\beta$ ещё прежний (следующий член ряда еще не вычислен). Записывая $X_{\beta m}$ через сумму предыдущих m членов ряда, выразим последующий член ряда $X_{(m+1)}^\beta$ через предыдущий X_m^β :

$$X_{m+1}^\alpha = \left(\delta^{\alpha\beta} + \frac{(a^{\alpha\beta})^{m+1}}{\sum_{p=0}^m (a^{\alpha\beta})^p} \right) X_{\beta m}. \quad (22)$$

В (22) в скобках – метрический тензор $g^{\beta\alpha}$; он связывает ковариантные и контравариантные компоненты вектора потока продуктов в отраслях – ветвях данной сети. Поскольку $a^{\beta\alpha} < 1$, то при стремлении числа членов ряда m к бесконечности дробное выражение стремится к нулю и тогда $g^{\beta\alpha} = \delta^{\beta\alpha}$. Итак, на каждом шаге вычислений $g^{\beta\alpha}$ переходит от сложной кривизны к нулевой кривизне декартова пространства.

В (22) отличны от нуля те компоненты тензора $g^{\beta\alpha}$, которые соответствуют поставкам, связывающим отрасли, т.е. $a^{\beta\alpha} \neq 0$. Они заданы структурой хозяйства. Их отличие от нуля показывает, что процесс установления потоков продуктов происходит в пространстве с кривизной. В [3] показано, что подобные геометрические аналогии соответствуют переходным процессам в электрических машинах. Изменение кривизны показывает переходные процессы, в частности при изменении структуры связей, разделении на независимые подсистемы, при внедрении инноваций.

Соответствие между продуктами и сетью обеспечивают двойственные источники в замкнутых путях: для этого введены источники ЭДС в ветвях поставок. Значение источников напряжения определяется итерациями при переходе к связанным отраслям, которые обмениваются своими продуктами. Применение двойственности позволяет представить процессы в живой системе экономики комбинацией двойственных величин в сети – неживой электрической цепи. Двойственные отклики замкнутых и разомкнутых путей в совокупности представляют сумму компонент:

– потоков продуктов в отраслях

$$X_p^\alpha = I_n^\alpha + \sum_{\mu=1}^{\mu=p} i_{n\mu}^\alpha = \sum_{\mu=0}^{\mu=p-1} (a_{\alpha\beta})^\mu y^\beta = y^\alpha + a_{\alpha\beta} y^\beta + (a_{\alpha\beta})^2 y^\beta + \dots + (a_{\alpha\beta})^{p-1} y^\beta; \quad (23)$$

– поставок между отраслями

$$x_p^{\alpha\beta} = I_m^\alpha + \sum_{\mu=1}^{\mu=p} i_{m\mu}^\alpha = (a_{\alpha\beta})^{p-1} y^\beta; \quad (24)$$

– ресурсов, потребляемых отраслями

$$r_p^{\gamma\alpha} = I_r^\alpha + \sum_{\mu=1}^{\mu=p} i_{r\mu}^\alpha = b_{\gamma\alpha} (y^\alpha + \sum_{\mu=0}^{\mu=p-1} (a_{\alpha\beta})^\mu y^\beta). \quad (25)$$

Эти суммы независимых, двойственных контурных и узловых токов численно равны потокам продуктов в отраслях, поставках и ресурсах, получаемым при вычислении p членов степенного ряда (при обращении экономической матрицы). Для расчёта по частям сетевая модель делится на подсистемы, решения которых затем алгоритмически соединяют в решение всей системы. Показано, что такой алгоритм обеспечивает многократное снижение объёма вычислений, ускоряя плановые расчёты [6,9].

Именно для этих целей модель первоначально и разрабатывалась. Однако сетевая модель генерирует также ковариантные компоненты вектора потока энергии (напряжения на ветвях сети). Они представляют пропорции денежных средств (например, оборотные средства), которые должны распределяться в системе производства для обеспечения заданного выпуска. Поскольку денежные потоки измеряются с точностью до стоимости денежной единицы (в энергетическом эквиваленте), пропорции так же, как потенциал измеряются не абсолютно, а относительно нулевого узла (заземления).

В каждой ветви этой сетевой модели представлены как воздействия (источники тока и напряжения), так и отклики (напряжения и токи). Потоки продуктов представлены только токами (отклики на источники двух видов). Напряжения (ковариантные компоненты вектора) не используются. В классической задаче баланса нет величин, которым соответствуют напряжения. Таким образом, сетевая модель сама генерирует величины, которые дают новое знание о системе. Это даёт подход к решению задачи объединённого материально-финансового баланса, которая не решена и в настоящее время.

Для моделирования инновационной экономики, когда постоянно происходит структурная перестройка, возникают новые отрасли, в условиях изменения структуры цен, нужно развитие этой модели. Модель должна отражать изменения в потоках продуктов при изменении цен, а также изменения в ценах при изменении потоков продуктов, обеспечить расчёт состояния и перспектив таких изменений. Например, влияние снижения производства нефти на динамику мировых цен или снижение цен на компьютеры в условиях насыщения рынка, или изменение стоимости в долларах: нефти, золота, серебра, евро, иены – при уменьшении стоимости валюты США, что наблюдалось в последние годы.

В этой связи возникает вопрос о существовании метрических характеристик в экономической системе. Их роль могут играть не только коэффициенты прямых затрат, которые устанавливают меру отношений между отраслями. Это могут быть также энергетические эквиваленты между спросом и производством, предложением. В сети денежных потоков, которая является *двойственной сетью* по отношению к сети продуктов, роль метрики играют ставки процентов за привлечение и размещение денежных средств.

Данная модель обеспечивает расчёты вариантов развития производственно-финансовых систем в интересах управления устойчивым развитием. Для современной экономики с рынками капитала, многократно превосходящими выпуск реального продукта, необходима модель более высокого уровня. Математический метод, который связывает изменения физических величин – это уравнения Максвелла. Они были получены на основе сетевой модели, которая сложилась в результате анализа опытов Фарадея. В работе Мак-

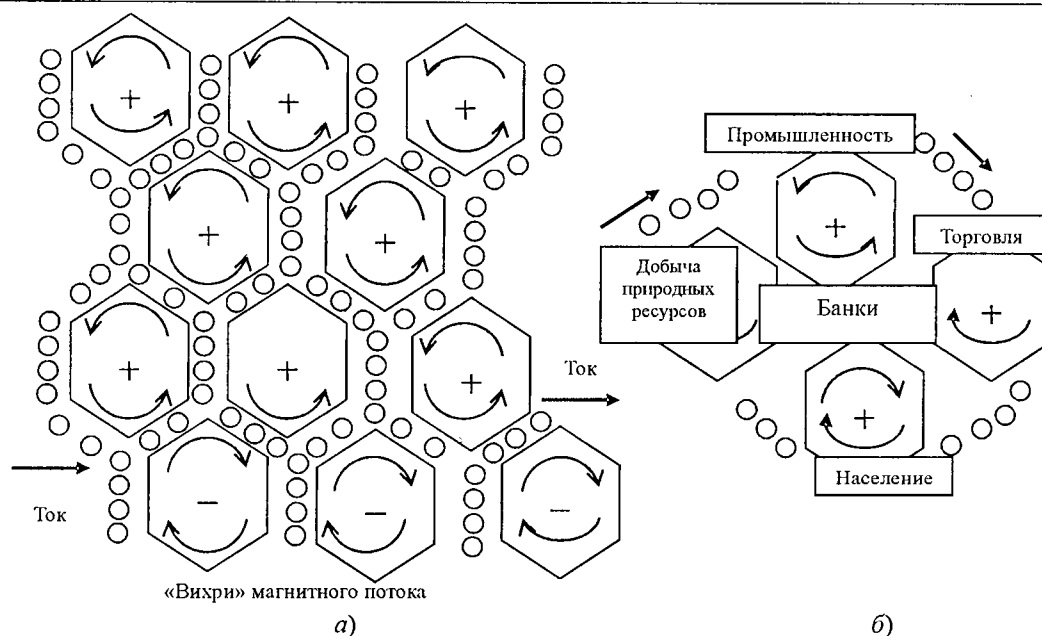


Рис. 4. Аналогии сетевой модели электромагнитного поля Максвелла (а) и сетевой модели товарно-денежного оборота в экономике (б)

светла «О физических силовых линиях», опубликованной в 1861 г., приводится наглядная картина электромагнитных процессов, которая представлена на рис. 4, а.

Слева кружки представляют поток электрического тока, который поступает в среду и покидает её по направлению стрелок. Воздействием является ЭДС, изменение которой приводит в движение потоки энергии. Шестиугольники представляют вихри (магнитного потока), которые постепенно передают энергию вращения соседним вихрям. А те своим вращением заставляют двигаться другие носители электрического тока. При снятии нагрузки вихри своей инерцией поддерживают ток, сопротивляясь его мгновенному затуханию.

Если воздействием является изменение (возрастание или убывание) магнитного поля, то откликом является поток электрической энергии, ток. Переходный процесс постепенно распространяется в среде. При снятии нагрузки ток, в виде движения зарядов, поддерживает магнитное поле, сопротивляясь его мгновенному затуханию.

Потоки денежных средств обозначены шестиугольниками. Этот процесс показан схематично на рис. 4, б, где кружки представляют движение продуктов между хозяй-

ствующими субъектами, а шестиугольники — оборот кредитно-денежных средств через расчётные, депозитные или кредитные счета в банках.

Список литературы:

1. Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа; Логос; 2000.
2. Kron G. Generalized theory of electrical machinery // AIEE Trans. 1930. V. 49. P. 666–683.
3. Kron G. Non-Riemannian dynamics of rotating electrical machinery // J. Math. Phys. 1934. V. 13. № 2. P. 103–194.
4. Wiener N. Notes on the Kron theory of tensors in electrical machinery // J. Electrical Engineering, China, 1936. № 3/4. P. 11–18.
5. Крон Г. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. Радио, 1978.
6. Петров А.Е. Тензорная методология в теории систем. М.: Радио и связь, 1985.
7. Веников В.А. Вступительная статья // Петров А.Е. Тензорная методология в теории систем. М.: Радио и связь, 1985.
8. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). М.: Наука, 1972.
9. Петров А.Е. Тензорный метод двойственных сетей. — М.: ООО ЦИТвП, 2007.
10. Kron G. Multi-dimensional curve-fitting with self-organizing automata // J. Math. Analysis and Appl. 1962. V. 5. № 1. P. 46–69.
11. Kron G. Invisible dual (n-1) networks induced by electric l-networks // IEEE Trans. V. CT-12, No 4, (December 1965).

Петров Андрей Евгеньевич, академик РАЕН, доктор технических наук, профессор кафедры САПР МГГУ. Окончил МИФИ в 1973 г. Защитил в 1998 г. докторскую диссертацию по теме «Тензорный метод двойственных сетей».

Исследование влияния управляемых выпрямителей с трансформаторами вращающегося магнитного поля на питающую сеть

ЧЕРЕВКО А.И., МУЗЫКА М.М.

На основании гармонического анализа питающих напряжений при различных характерах нагрузки установлены зависимости коэффициентов гармоник питающего напряжения от числа пар силовых ключей коммутаторов выпрямителей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями.

Ключевые слова: управляемые выпрямители, трансформаторы с вращающимися магнитными полями, гармонический анализ, коэффициент гармоник, коэффициент мощности

Замена в составе трёхфазных мостовых тиристорных преобразователей трансформаторов с пульсирующими магнитными полями на трансформаторы с вращающимися магнитными полями (ТВМП) [1–5] вызвала изменение силовых схем управляемых выпрямителей (УВ), которые стали подобны коммутаторам вентильных электродвигателей [2]. Увеличение числа пар силовых ключей (СКЛ) в составе коммутаторов отводов вторичной круговой обмотки (КО) ТВМП повлекло за собой увеличение числа пульсаций в выходном напряжении УВ с ТВМП и, как следствие, значительное повышение качества выпрямленного напряжения [4,5], вместе с тем пока неясно как это отразится на питающем напряжении. Если уподобить УВ с ТВМП классической трёхфазной мостовой схеме с трансформатором с пульсирующими магнитными полями (ТПМП), то силовые схемы УВ с ТВМП, когда первичная обмотка выполнена в виде трёхфазной обмотки (ТО), а вторичная обмотка в виде КО якорного типа (фактически в виде треугольника), будут иметь вид, представленный на рис. 1.

Так как степень влияния УВ на питающую сеть для автономных электроэнергетических комплексов и систем регламентируется ГОСТ и отраслевыми нормами [1,3–8], рассмотрим влияние УВ с ТПМП и ТВМП на питающую сеть с помощью схемотехнических моделей в Micro-Cap [4–7]. Схемы замещения УВ с ТВМП уподобим схемам трёхфазного мостового выпрямителя с ТПМП с со-

On the basis of the harmonious analysis of having voltage at various characters of loading dependences of factors of harmonics of a having voltage on number of pairs power keys of switchboards of rectifiers with transformer with rotating magnetic field are establishd.

Key words: controlled rectifiers with, transformers from a rotating magnetic field, harmonious analysis, factor of harmonics, factor of capacity

единением обмоток Y/Y и Y/Δ (рис. 1), для которых влияние УВ на питающую сеть изучено достаточно хорошо [1–3, 8].

Моделирование УВ с ТВМП малой и средней мощности с большим числом секций КО и, соответственно, с большим числом пар СКЛ показало [4–6], что кроме переходных процессов, происходящих в обмотках ТВМП и в нагрузке, в макромодели УВ с ТВМП рассчитываются процессы, происходящие в нелинейных ключевых элементах – транзисторах и тиристорах. Описание макромодели каждого из транзисторов, библиотеки программы MicroCAP, с помощью которых моделируются СКЛ, требует указывать 56 параметров, большинства из которых в справочной литературе нет, а ряд транзисторов вообще не имеет отечественных аналогов. Модели же тиристоров вообще представляются в виде макросов на базе соединения двух транзисторов [6]. В результате с ростом мощности УВ с ТВМП и числа пар СКЛ сложность макромоделей СКЛ начинает оказывать значительное влияние на скорость анализа исследуемой схемы УВ [4–6] и устойчивость процесса моделирования.

Для упрощения моделирования УВ с ТВМП и повышения устойчивости моделирования, авторами было предложено [8] заменить макромодели транзисторов и тиристоров упрощёнными моделями ключевых элементов, требующими для описания не более трёх параметров – сопротивления ключа

в открытом и закрытом состоянии и значения тока «удержания».

Используя упрощённую модель тиристорного ключа, в программной среде МС8 были разработаны макромодели классических

трёхфазных мостовых УВ с ТПМП с соединением обмоток Y/Y и Y/Δ и макромодели УВ с ТВМП на 3–8 пар СКЛ [4–6, 8], с помощью которых был выполнен сравнительный анализ влияния УВ на питающую сеть.

С использованием упрощённых моделей ключевых элементов для УВ с ТВМП на 3–8 пар СКЛ были разработаны их макромодели и проведено исследование влияния на питающую сеть, когда мощность УВ составила 35% мощности источника питающей сети. При аналогичных условиях (для сравнения) было проведено исследование влияния на питающую сеть УВ с ТПМП.

Параметры источника питания, согласующих трансформаторов и нагрузки УВ, которые использовались при разработке макромодели управляемых выпрямителей в программной среде МС-8

Амплитуда напряжения источника питания U_m , В	311
Активное внутреннее сопротивление источника R_i , Ом	0,478
Собственная индуктивность источника L_i , мГн	30
Активное сопротивление фазы первичной обмотки R_s , Ом	0,478
Индуктивность фазы первичной обмотки L_s , мГн	30
Индуктивность фазы ТО ТПМП и секции КО ТВМП L_j , мГн:	
Y/Y	51
Y/Δ	150
$N_{с.кл}=3$	100
$N_{с.кл}=4$	60
$N_{с.кл}=5$	40
$N_{с.кл}=6$	27
$N_{с.кл}=7$	18,5
$N_{с.кл}=8$	15,9
Активное сопротивление нагрузки R_H , Ом:	
$L_{d^*}=0,06$	23,49
$L_{d^*}=0,08$	17,61
$L_{d^*}=0,10$	14,09
$L_{d^*}=0,12$	11,74
Индуктивность нагрузки L_H , мГн:	
$L_{d^*}=0,06$	373,8
$L_{d^*}=0,08$	280,3
$L_{d^*}=0,10$	224,3
$L_{d^*}=0,12$	186,9

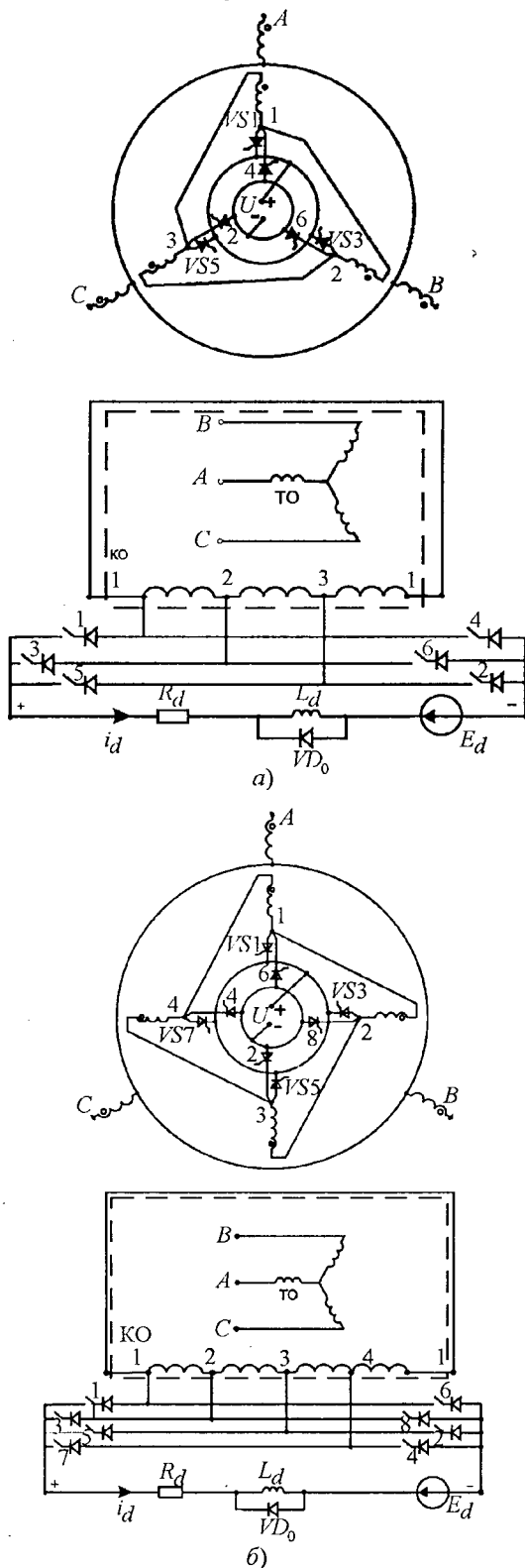


Рис. 1. Схемы УВ с ТВМП на 3 и 4 пары силовых ключей (а) и мостовые схемы замещения УВ с ТВМП с 3 и 4 секциями в составе КО (б)

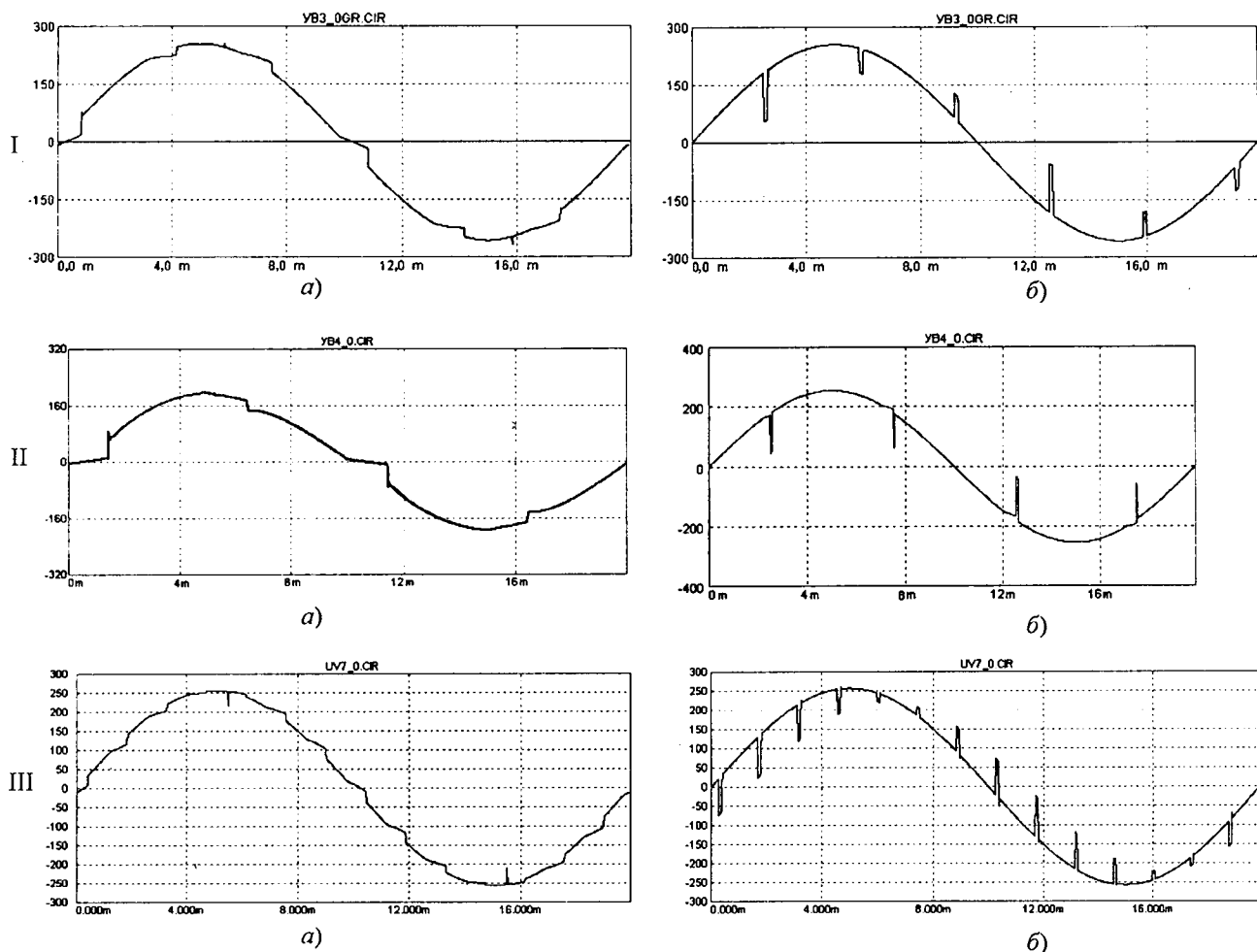


Рис. 2. Фазные напряжения в ТО ТВМП при различном числе пар СКЛ и углах управления: $\alpha = 0$; б) 60° ; I – 3 пары СКЛ; II – 4 пары СКЛ; III – 7 пар СКЛ

На рис. 2 представлены формы кривых фазных напряжений питающей сети на входе УВ с ТВМП при 3, 4 и 7 парах СКЛ, при активно-индуктивной нагрузке и углах управления $\alpha = 0$ и 60° .

В фазном напряжении трёхфазного мостового тиристорного преобразователя с соединением обмоток ТПМП Y/Y на одном периоде фазного напряжения, как известно, имеют место четыре коммутационных искажения, а при соединении обмоток Y/Δ – шесть [1,9]. Анализ форм кривых фазных напряжений на входе УВ с ТВМП показывает, что при трёх парах силовых ключей, когда обмотки ТВМП соединены по схеме $Y/КО$, число коммутационных искажений в фазных напряжениях на одном периоде питающей сети равно числу искажений в фазных напряжениях УВ с ТПМП, когда обмотки соединены по схеме Y/Δ , что можно использовать для сравнительного анализа УВ с ТПМП и УВ с ТВМП.

Исследование форм кривых фазных напряжений на входе УВ с ТВМП при произ-

вольном числе пар СКЛ показывает (рис. 2), что число коммутационных искажений в фазных напряжениях на одном периоде питающего напряжения однозначно зависит от числа пар силовых ключей. Так, при чётном числе пар СКЛ, в кривых фазных напряжений на входе УВ с ТВМП чётное число коммутационных искажений, равное числу пар СКЛ, а при нечётном числе коммутационных искажений удваивается.

Так как программа МС-8 позволяет получать спектральный состав исследуемых форм кривых токов (I_v) и напряжений (U_v), то для фазных токов и напряжений питающей сети можно рассчитать зависимости коэффициентов гармоник тока и напряжения:

$$K_{rI} = \frac{\sqrt{\sum I_v^2}}{I_1} \cdot 100\%; \quad K_{rU} = \frac{\sqrt{\sum U_v^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

а также коэффициентов искажения форм кривых тока и напряжения ($K_{иI}$ и $K_{иU}$), коэффициента искажения мощности (λ), коэффициента сдвига по

фазе между первыми гармониками напряжения и тока ($\cos\varphi_1$) и коэффициента мощности (χ):

$$K_{иI} = \frac{I_1}{I}; K_{иU} = \frac{U_1}{U}; \lambda = K_{иU} K_{иI}; \quad (2)$$

$$\cos\varphi_1 = \cos(\psi_{U1} - \psi_{I1}); \chi = \lambda \cos\varphi_1$$

в функции относительного значения тока нагрузки, например для $I_{d^*} = 0,1$, при добротности нагрузки $Q = 5$, когда $\alpha = 0^\circ$ и при различном числе пар силовых ключей $N_{с.кл}$ в составе коммутаторов УВ с ТВМП.

Спектры относительных значений гармоник фазных токов и напряжений на входе УВ с ТПМП для схем Y/Y и Y/Δ и УВ с ТВМП при $N_{с.кл} = 3, 4$ и 7 пар СКЛ в качестве примера представлены в табл. 1.

Анализ спектра гармоник и их относительных значений на входе УВ с ТПМП показывает, что у классической трёхфазной мостовой схемы, когда обмотки ТПМП соединены по схемам Y/Y и Y/Δ , кроме канонических гармоник с порядковыми номерами $\nu = 6k \pm 1$ (где $k = 0, 1, 2, \dots$), присутствуют 3-я и кратные ей гармоники. Причём в случае соединения обмоток ТПМП по схеме Y/Δ их относительные значения оказываются при-

мерно в 4,5 раза больше, чем при соединении по схеме Y/Y , однако их абсолютные значения по сравнению с каноническими гармониками оказываются незначительными, что позволяет их влиянием на энергетические процессы пренебречь. Появление 3-й и кратных ей гармоник вызвано, скорее всего, несимметрией управления и погрешностями, связанными с расчётными методами, положенными в основу решения дифференциальных уравнений в программной среде МС-8. Аналогичные причины, очевидно, обуславливают появление 3-й и кратных ей гармоник на входе УВ с ТВМП.

УВ с ТВМП при 3 парах СКЛ имеет спектр гармоник напряжения, соответствующий классической трёхфазной мостовой схеме, когда обмотки ТПМП соединены по схеме Y/Δ . Наихудшее качество питающего напряжения получается на входе УВ с ТВМП при 4 парах СКЛ, причём 3-я и кратные ей гармоники оказываются соизмеримыми с каноническими гармониками, что говорит о высокой критичности простейшей схемы с

Таблица 1

$N_{с.кл}$	3Y/Y		3Y/Δ		3Y/КО		4Y/КО		7Y/КО	
	U_ν	I_ν	U_ν	I_ν	U_ν	I_ν	U_ν	I_ν	U_ν	I_ν
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
3	0,000	0	0,002	0	0,004	0	0,334	0,081	0,001	0
5	0,232	0,023	0,231	0,023	0,206	0,030	0,120	0,017	0,001	0
7	0,117	0,008	0,116	0,009	0,105	0,011	0,110	0,011	0	0
9	0,000	0	0,002	0	0,004	0	0,075	0,006	0,001	0
11	0,094	0,004	0,094	0,004	0,083	0,006	0,062	0,004	0,001	0
13	0,066	0,003	0,065	0,003	0,060	0,003	0,056	0,003	0,085	0,004
15	0,000	0	0,002	0	0,004	0	0,042	0,002	0,062	0,003
17	0,059	0,002	0,059	0,001	0,052	0,002	0,044	0,002	0,001	0
19	0,046	0,001	0,045	0,001	0,042	0,002	0,031	0,001	0,001	0
21	0,000	0	0,002	0	0,004	0	0,035	0,001	0	0
23	0,043	0,001	0,044	0,001	0,038	0,001	0,027	0,001	0,001	0
25	0,035	0,001	0,034	0,001	0,032	0,001	0,028	0,001	0,001	0
27	0,000	0	0,002	0	0,004	0	0,025	0,001	0,040	0,001
29	0,034	0,001	0,035	0,001	0,030	0,001	0,022	0,001	0,033	0,001
31	0,028	0,000	0,028	0,001	0,026	0,001	0,023	0,001	0,001	0
33	0,000	0	0,002	0	0,004	0	0,019	0	0,001	0
35	0,028	0,000	0,029	0	0,025	0,001	0,021	0,001	0	0
37	0,024	0,000	0,023	0	0,022	0	0,018	0	0,001	0
39	0,000	0	0,002	0	0,004	0	0,018	0	0,001	0

чётным числом пар СКЛ к несимметрии управления силовыми ключами.

Исследование моделей показало, что УВ с ТВМП при 6 парах СКЛ по спектру гармоник эквивалентен УВ с ТВМП при 3 парах СКЛ. Таким образом, для УВ с ТВМП с чётным числом пар СКЛ канонические гармоники, действующие на входе выпрямителей, можно определять из выражения

$$\nu = N_{\text{с.кл.чѐт}} k \pm 1. \quad (3)$$

Анализ спектра гармоник и их относительных значений на входе УВ с ТВМП при нечётном числе пар СКЛ показывает, что порядковые номера канонических гармоник, имеющих основной «энергетический вес», будут определяться выражением

$$\nu = 2N_{\text{с.кл}} k \pm 1. \quad (4)$$

В соответствии с выражениями (1) и (2), с использованием результатов гармонического анализа (табл. 1), были выполнены расчёты зависимостей K_{rU} и K_{rI} , K_{nU} и K_{nI} , λ , $\cos\varphi_1$ и χ в функции относительного значения тока нагрузки I_{d^*} для УВ с ТПМП, когда обмотки включены по схемам Y/Y и Y/Δ, а также для УВ с ТВМП при различном числе пар СКЛ. Рассчитанные коэффициенты (за исключением K_{rI} , который не регламентируется ГОСТ) представлены в табл. 2 для $I_{d^*} = 0,1$ и на рис. 3. Здесь для всех УВ принято: угол управления $\alpha = 0$, а добротность нагрузки $Q = 5$.

Относительный ток нагрузки (I_{d^*}), выраженный в долях тока КЗ ($I_{K3\text{max}}$), для всех УВ изменялся в пределах от 0,06 до 0,12 о.е., что соответствовало случаю, когда мощности питающей сети и выпрямительного агрегата соизмеримы, причём за амплитуду тока КЗ принималось значение, соответствовавшее

току КЗ в классической трёхфазной мостовой схеме выпрямления [1,9].

Ток КЗ определялся в соответствии с известным аналитическим соотношением [1]:

$$I_{K3\text{max}} = \sqrt{6} E_{\phi} / (2X_a), \quad (5)$$

где E_{ϕ} – фазная ЭДС источника питания; X_a – анодное реактивное сопротивление согласующего трансформатора и питающей сети.

Из анализа графиков $K_{rU} = f(I_{d^*}, N_{\text{с.кл}})$ следует, что K_{rU} у классических трёхфазных мостовых выпрямителей с ТПМП при соединении обмоток Y/Y и Y/Δ и у выпрямителей с ТВМП при трёх парах СКЛ примерно одинаковые.

У выпрямителей с ТВМП при чётных $N_{\text{с.кл}} = 4, 6, 8$ примерно в 2–3 раза больше, чем у УВ с ТВМП с нечётным числом пар СКЛ $N_{\text{с.кл}} = 3, 5, 7$.

УВ с ТВМП на 7 пар СКЛ практически без каких-либо дополнительных мероприятий имеет коэффициент гармоник по напряжению на уровне 11–12%. Учитывая закономерность снижения K_{rU} с увеличением числа пар СКЛ, можно предположить, что уже при $N_{\text{с.кл}} = 9$, в автономных электроустановках, где мощности источника и выпрямительного агрегата соизмеримы, K_{rU} 10%, установленного ГОСТ 13109-97, во всём диапазоне регулирования выпрямленного напряжения.

Анализ графиков K_{nU} , λ , $\cos\varphi_1$ и χ для указанных выпрямителей, приведённых на рис. 3, подтверждает общую закономерность лучших показателей при нечётном числе пар силовых ключей в составе коммутаторов УВ с ТВМП. Так, при 7 парах СКЛ в составе УВ с ТВМП, $K_{nU} = 0,993 \div 0,991$, $\lambda = \sim 0,995 \div 0,994$, $\chi = 0,75 \div 0,9$ на интервале, когда I_{d^*} изменя-

Таблица 2

Параметр	Y/Y	Y/Δ	Y/KO					
			3	4	5	6	7	8
k_{rU}	0,3110	0,3100	0,2760	0,4070	0,1620	0,2830	0,1290	0,2110
k_{rI}	0,0250	0,0260	0,0330	0,0840	0,0100	0,0320	0,0060	0,0160
$k_{\phi U}$	0,9548	0,9550	0,9646	0,9269	0,9875	0,9628	0,99220	0,9790
$k_{\phi I}$	0,99969	0,99967	0,99946	0,99652	0,99995	0,99947	0,99998	0,99987
λ	0,9540	0,9550	0,9700	0,9440	0,9900	0,9670	0,9930	0,9820
$\cos(\varphi_1)$	0,7890	0,7360	0,7460	0,3530	0,7960	0,6140	0,8730	0,6610
χ	0,80154	0,7020	0,7200	0,3260	0,7860	0,5910	0,8660	0,6470

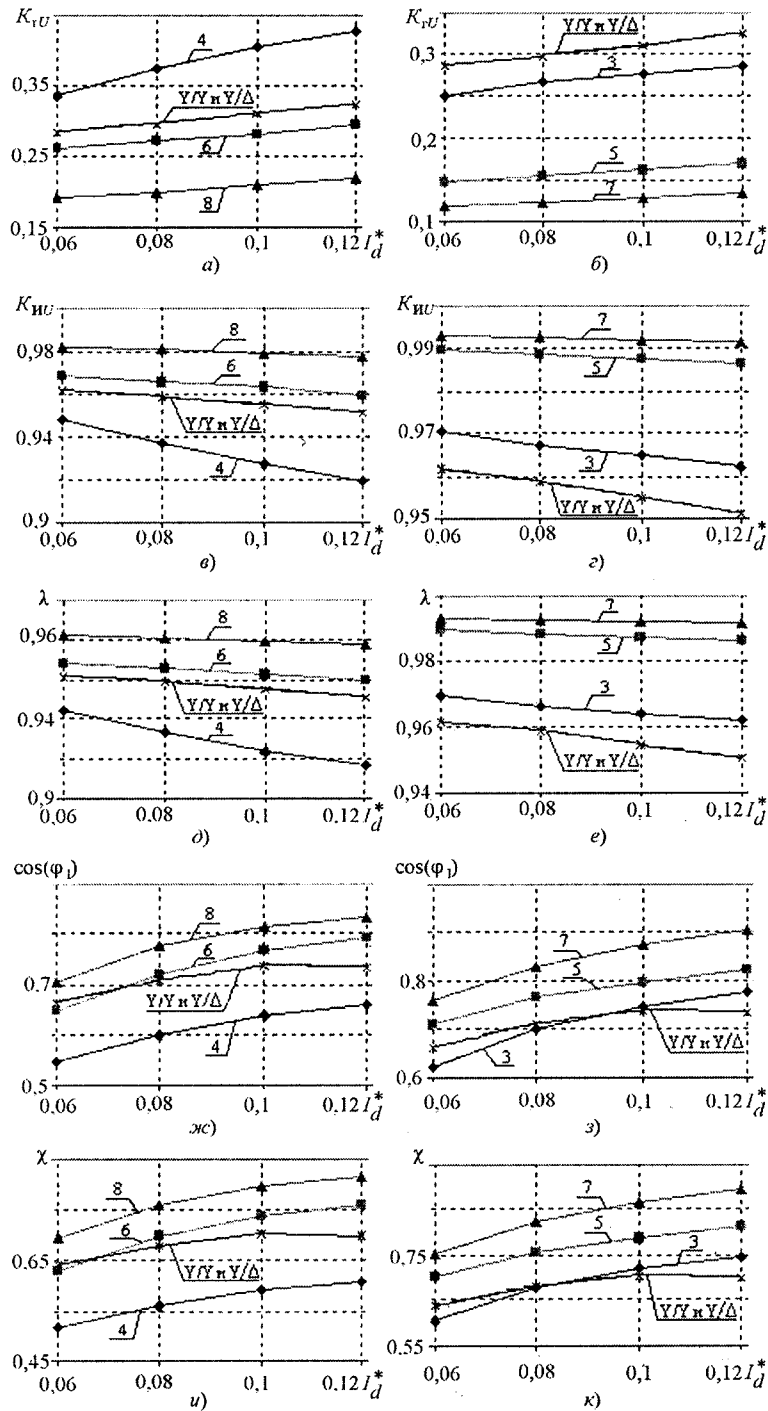


Рис. 3. Коэффициенты, характеризующие влияние УВ с ТВМП на питающую сеть

ется от 0,78 до 0,85 о.е., что весьма важно для автономных электроэнергосистем [3,10].

Совокупность параметров, достигаемых в УВ с ТВМП при 7 парах СКЛ, а также возможность применения в самом ТВМП конструктивных мероприятий для подавления гармоник, таких как сокращение шага трёхфазных обмоток по пазам, выбор оптимального числа пазов на полюс и фазу, скос пазов в цилиндрическом магнитопроводе, позволят обеспечить $K_{rU} = 2\div 3\%$ [10].

Выводы

1. Разработанные в программной среде МС-8 макромодели управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформаторов с вращающимися и пульсирующими магнитными полями на базе упрощённых моделей ключевых элементов, позволяют получить достаточно надёжный способ сравнительного анализа полупроводниковых преобразователей.
2. Сравнительный анализ УВ с ТПМП и УВ с ТВМП при 3 парах силовых ключей

показал, что они имеют близкие характеристики, но УВ с ТВМП оказывает на питающую сеть несколько меньшее влияние, чем классические трёхфазные мостовые выпрямители.

3. Сравнительный анализ УВ с ТВМП при чётном и нечётном числе пар силовых ключей показал, что УВ с ТВМП при чётном числе пар силовых ключей оказывает влияние на питающую сеть, примерно в 2-3 раза большее, чем при нечётном числе пар СКЛ.

4. Питающее напряжение на входе УВ с ТВМП уже при 7 парах силовых ключей практически соответствует требованиям ГОСТ 13109-97, а при использовании в ТВМП ряда конструктивных мероприятий в автономных электроэнергетических системах в принципе можно обеспечить практически синусоидальные режимы работы электрооборудования.

Список литературы

1. Розанов Ю.К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники // Электричество. 2005. № 7. С. 52–61.
2. Лутидзе Ш.И., Михневич Г.В., Тафт В.А. Введение в динамику синхронных машин и машинно-полупроводниковых систем. М.: Наука, 1973.
3. Пашин В.М., Свиридов Г.М. Новые принципы построения мощных статических преобразователей гребных электрических установок // Судостроение. 2007. № 2. С. 29–33.
4. Черевко А.И., Музыка М.М. Схемотехническое моделирование мостовых преобразователей на базе трансформаторов с цилиндрическими и классическими магнитопроводами // Материалы IX РНТК «ЭМС–2006». СПб., С. 533–535.
5. Черевко А.И., Музыка М.М., Лимонникова Е.В., Ивлев М.Л. Анализ влияния схемы выпрямителя с ТВМП, питающего мощный электропривод, на качество напряжения и

энергетические характеристики // Материалы V МНТК (XVI ВНТК) по автоматизированному электроприводу. СПб., 2007. С. 429–431.

6. Черевко А.И., Музыка М.М., Лимонникова Е.В. Схемотехническое и математическое моделирование полупроводниковых преобразователей, содержащих согласующие трансформаторы с вращающимися магнитными полями. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005.

7. Черевко А.И., Семенов Д.Н., Казакевич А.И. Схемотехнические модели выпрямителей с трансформаторами вращающегося магнитного поля в MICRO-CAP 7 // Электротехника. 2005. № 4. С. 8–15.

8. Черевко А.И., Музыка М.М. Упрощенная модель тиристорного ключа в программной среде MicroCAP -7 // Технологии ЭМС. 2007. № 2. С. 46–50.

9. Черевко А.И. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и электрооборудования в автономных электроэнергетических установках. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005.

10. Черевко А.И. Полупроводниковые преобразователи автономных электроустановок с трансформаторами вращающегося магнитного поля, обладающие высоким качеством выходного напряжения. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005.

Черевко Александр Иванович – профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника», декан факультета повышения квалификации «Севмашвтуз» – филиала С.-Петербургского государственного морского ТУ (СПбГМТУ) в г.Северодвинске, доктор техн. наук. Окончил завод-втуз Ленинградского кораблестроительного института в 1971 г. по специальности «Электрооборудование судов». Защитил кандидатскую диссертацию в специализированном Совете ЛЭИ в 1977 г., докторскую – в диссертационном Совете при СПбГМТУ в 2006 г.

Музыка Михаил Михайлович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и управление в технических системах» «Севмашвтуза», аспирант-заочник СПбГМТУ. Окончил «Севмашвтуз» – филиал СПбГМТУ в г.Северодвинске в 2000 г.

ПОПРАВКА

В журнале «Электротехника» № 11 за 2008 г. в ст. Кобелева А.С., Макарова Л.Н., Русаковского А.М. «Концепция разработки электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей энергоэффективных серий» на с. 23 в сведениях об авторах должно быть следующее:

Кобелев Андрей Степанович – начальник расчётно-теоретического сектора ОАО «НИПТИ-ЭМ», канд техн. наук. В 1980 г. окончил Куйбышевский аграрный университет по специальности «Электрификация сельского хозяйства». В 1991 г. защитил диссертацию по теме «Разработка численных алгоритмов и методики поверочного электромагнитного расчёта трёхфазных асинхронных двигателей с безотходным и малоотходным магнитопроводом» в МЭИ.

Макаров Лев Николаевич – генеральный конструктор Концерна «РУСЭЛПРОМ», генеральный директор ОАО «НИПТИЭМ», доктор техн. наук, чл.-кор. РАН.

Русаковский Алексей Михайлович – генеральный директор ОАО «ВЭМЗ», зам. генерального директора ООО «РУСЭЛПРОМ», доктор электротехники, чл.-кор. РАН.

Обнаружение локационным методом однофазных замыканий проводов линий электропередачи на землю¹

МИНУЛЛИН Р.Г., ПЕТРУШЕНКО Ю.Я., ФАРДИЕВ И.Ш., ЛУКИН Э.И., ЛУКИНА Г.В.

Исследуются особенности обнаружения локационным методом однофазных замыканий проводов воздушных линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 6–35 кВ, имеющих древовидную топологию, и напряжением 110 кВ и выше, имеющих линейную структуру. Показаны способы распознавания рефлектограмм при наличии поврежденных проводов ЛЭП. Исследования выполнены в лабораторных условиях на макетах и моделях электролиний, а также в полевых условиях на действующих ЛЭП.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, воздушные линии электропередачи, локационное зондирование

В России используется четыре способа заземления нейтрали в распределительных сетях: изолированная, компенсированная, резистивно-заземлённая и комбинированная — с резистором и дугогасящим реактором в нейтрали [1–5]. Различают сети: незаземлённые; заземлённые через настроенные индуктивные сопротивления; эффективно заземлённые, в которых часть нейтралей обмоток трансформаторов разземлена, но предусмотрена аппаратура для их защиты; глухозаземлённые [1–5].

При этом электрические сети с номинальным напряжением от 6 до 35 кВ включительно не заземляют или заземляют через настроенные индуктивные сопротивления. В сетях с изолированной нейтралью провода трёхфазной системы имеют связь с землёй только через ёмкости фаз и проводимости изоляции, распределённые по длине линии [1–5]. Поэтому при однофазном замыкании провода на землю (ОЗЗ) ток в месте повреждения не превышает несколько десятков ампер. Напряжение повреждённого провода при этом равно нулю, а напряжение непо-

The hallmarks of detection of monophasе short-cuts on earth in electricity transmission lines (ETL) 6-35 kV voltage with diversified structure and 100 kV and higher voltage ETL with linear structure are assessed. The ways of recognition of reflectograms in case of distortions in ETL. The trials were performed in laboratory settings using the ETL models and in real conditions on working ETLs.

Key words: mono-phase short-cuts, electricity transmission lines (ETL), location method

вреждённых проводов относительно земли повышается до уровня линейного, напряжение между проводами не изменяется и электроснабжение потребителей не нарушается. Обнаружить такие повреждения весьма сложно.

При ОЗЗ потенциал нейтрали определяется, главным образом, падением напряжения на сопротивлении в месте повреждения, основными составляющими которого являются сопротивление дуги, тлеющей изоляции, сопротивление растеканию тока в земле.

Свойства компенсированных сетей близки к свойствам сетей с изолированной нейтралью, если ёмкостный ток замыкания на землю последних не превышает допустимого значения. Компенсированные сети применяются при напряжениях меньше 35 кВ.

Сети с номинальным напряжением 110–220 кВ заземляют эффективно. При этом ток однофазного КЗ достигает десятков тысяч ампер. Напряжение повреждённого провода равно нулю, а напряжение неповреждённых проводов относительно земли не превышает 1,4 фазного напряжения сети. Ток КЗ на землю в этом случае достигает больших значений и подлежит отключению, как и в случае межфазных КЗ.

Сети с номинальным напряжением 330 кВ и выше работают с глухозаземлённой нейтра-

¹ Исследования выполнены на средства фонда НИОКР ОАО «Татэнерго» за 2005–2007 гг., а также фонда НИОКР Республики Татарстан (грант Академии наук Республики Татарстан, проект № 06-6.7-345/2005-2006/Ф).

лю. При этом напряжение на неповреждённых фазах не превышает номинального.

В последних двух случаях повреждённый участок сети отключается релейной защитой автоматически в течение нескольких десятых долей секунды.

Установки и сети с заземлённой нейтралью значительно дешевле, что существенно для линий 110 кВ и выше. При заземлённой нейтрали повышается безопасность эксплуатации, так как обеспечивается чёткое и надёжное действие релейной защиты и быстрое отключение повреждений [1–5].

Однофазные замыкания являются причиной возникновения перенапряжений высокой кратности, которые могут вызвать повреждение изоляции, пожары, взрывы, поражение людей током. При однофазном замыкании на землю в резистивно-заземлённых сетях возможны повреждения, которые с точки зрения защиты можно разделить на несколько основных категорий [5]:

- кратковременные пробой;
- «металлические», бездуговые однофазные замыкания на землю (например, с заземлённой металлической опорой);
- однофазные замыкания на землю через большие переходные сопротивления – около 5–7 кОм (например, при связи фазы с землей через деревянные части конструкции, при падении провода на сухой грунт и т.д.);
- дуговые однофазные замыкания на землю (наблюдаются при пробоях и перекрытиях фазной изоляции, возникает перемежающаяся дуга);
- обрывы воздушных линий электропередачи, не сопровождающиеся длительными однофазными замыканиями на землю (возникают в сетях 6–35 кВ и являются как бы «смежными» с однофазными замыканиями на землю).

В статье рассматриваются реакции различных видов ОЗЗ на импульсное локационное зондирование с целью построения новых видов релейной защиты, так как эксплуатируемые в российских сетях с изолированной и компенсированной нейтралью защиты далеки от совершенства. Поэтому требуется разработка новых, более совершенных защит линий от однофазных замыканий на землю, которые должны выбираться с учётом режима заземления нейтрали [5].

Лабораторные исследования

Лабораторные исследования локационным методом случаев ОЗЗ были выполнены на

макете воздушной линии длиной 50 м, провода которой крепятся к траверсам железобетонных опор через керамические изоляторы, марка провода АС-70. Особенности зондирования ЛЭП и методика измерений были рассмотрены ранее [6–13].

Были осуществлены две серии опытов: замыкание провода линии на снег (зима) и замыкание на грунт (лето). Сравнивались рефлектограммы линии при двухфазном КЗ и ОЗЗ в одной и той же точке линии.

На рис. 1 представлены результаты исследования однофазного замыкания линии на землю в зимний период, т.е. на снег. Параметры, установленные на рефлектометре РЕЙС-105Р во время зондирования: импульс положительной полярности с амплитудой $U = 3,5$ В и длительностью $\tau = 0,042$ мкс; усиление 6 дБ. РЕЙС-105Р подключался к линии по схемам «фаза–земля» (левая колонка рис. 1,а) и «фаза–фаза» (правая колонка рис. 1,а). Однофазное замыкание линии на землю (снег) производилось алюминиевым проводом на расстоянии 38 м от её начала в точке В.

На рис. 1,б показаны рефлектограммы $U_{ф.з}(l)$ для схемы «фаза–земля» и $U_{ф.ф}(l)$ для схемы «фаза–фаза» воздушной линии в исходном состоянии, при этом концы линии в точке В разомкнуты (режим ХХ), что характеризуется импульсом положительной полярности, отражающимся в этой точке.

На рис. 1,в приведены рефлектограммы линии при двухфазном КЗ в точке В, создающем отражённый отрицательный импульс. Для большей достоверности применяем разностный метод: вычитаем исходные рефлектограммы $U_{ф.з}(l)$ и $U_{ф.ф}(l)$ неповреждённой линии (рис. 1,б) соответственно из аналогичных рефлектограмм $U_{ф.з}(l)$ и $U_{ф.ф}(l)$ линий с двухфазным КЗ (рис. 1,в). На разностных рефлектограммах $\Delta U_{ф.з}(l)$ и $\Delta U_{ф.ф}(l)$ (рис. 1,г) точно определяется место повреждения на расстоянии 38 м от начала линии в виде первого явно выраженного отрицательного импульса с большой амплитудой. Его амплитуда значительно больше амплитуд предшествующих ему импульсов шумовой составляющей сигнала и поэтому выделяется абсолютно достоверно.

При присоединении рефлектометра к линии по схеме «фаза–фаза» амплитуда импульса, отражённого от места двухфазного КЗ (точка В на правой рефлектограмме рис. 1,в), больше, чем при присоединении рефлектометра по схеме «фаза–земля» (точка В

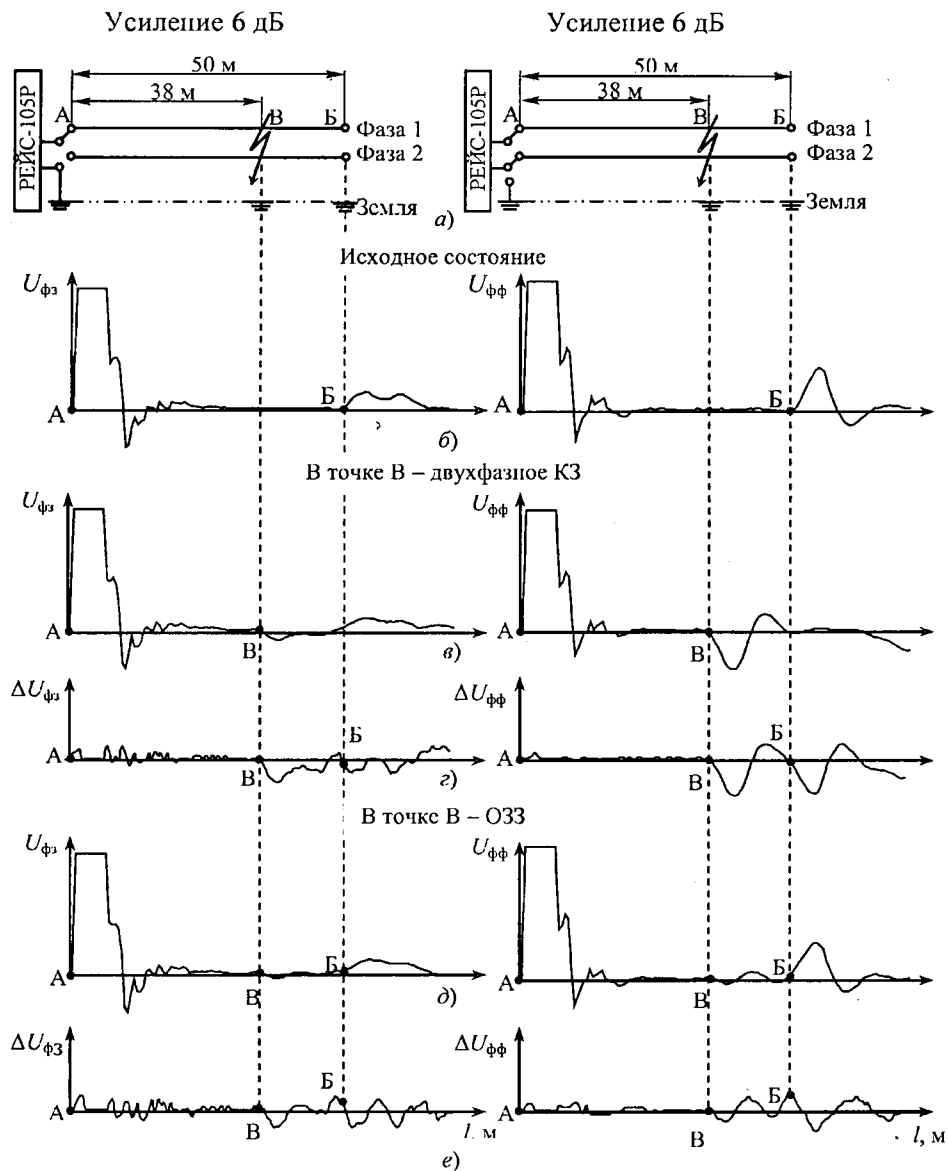


Рис. 1. Идентификация повреждений воздушной линии длиной 50 м в виде замыканий на расстоянии 38 м от ее начала при зондировании импульсом длительностью 0,042 мкс: а – схемы подключения рефлектометра; б – рефлектограммы линии в исходном состоянии; в – рефлектограммы при двухфазном КЗ; г – разность рефлектограмм в и б; д – рефлектограммы при ОЗЗ (снег); е – разность рефлектограмм д и б

на левой рефлектограмме рис. 1, в). Этого и следовало ожидать, так как проводимость земли меньше, чем проводимость металлического провода.

Импульсы в точке В рефлектограмм $U_{ф.з}(l)$ и $U_{ф.ф}(l)$ (рис. 1, д), обусловленные однофазным замыканием на землю, соответствуют расстоянию 38 м от начала линии, имеют примерно одинаковые амплитуды и обнаруживаются менее отчетливо в сравнении с импульсами двухфазного КЗ в этой же точке. Но при применении разностного метода отрицательные импульсы этого вида повреждения в точке В определяются на разностных

рефлектограммах $\Delta U_{ф.з}(l)$ и $\Delta U_{ф.ф}(l)$ (рис. 1, е) достаточно уверенно.

Условия отражения импульсов при двухфазном КЗ и при однофазном замыкании на землю различаются не только амплитудой отражённых импульсов.

При двухфазном КЗ зондирующий импульс полностью отражается от места КЗ, где сопротивление равно нулю, и дальше в линию не проходит. Поэтому положительный импульс, обычно отражающийся от разомкнутого конца линии в точке В, отсутствует. Наблюдаемые в этом случае на правой рефлектограмме рис. 1, в колебания сигнала яв-

ляются следствием неоптимального согласования выходного сопротивления рефлектометра с волновым сопротивлением линии. При однофазном замыкании на землю сопротивление в точке замыкания не равно нулю, поэтому часть энергии импульса отражается от места однофазного замыкания на землю в точке *B*, а часть проходит дальше в линию и отражается от разомкнутого конца линии в точке *Б*, что хорошо видно на правой рефлектограмме рис. 1, *д*.

На рис. 2 представлены результаты проведённых измерений на этой же линии при замыкании провода одной фазы на грунт на расстоянии 38 м от начала линии в точке *B*. Так же, как при исследовании условий однофазного замыкания на снег, были выполнены аналогичные опыты с двухфазным КЗ

(рис. 2, *в*) и однофазным замыканием на землю (рис. 2, *д*). С помощью разностного метода были точно определены места повреждений на расстоянии 38 м от начала линии (рис. 2, *з, е*). На рефлектограммах рис. 2 видны такие же закономерности в отражении импульсов, как и на рис. 1.

Следовательно, можно утверждать, что отражённые импульсы при однофазных замыканиях провода электролинии на снег или на грунт существенно друг от друга не отличаются ни по амплитуде, ни по форме и уверенно распознаются при применении разностного метода.

Полевые исследования

Линии электропередачи напряжением 6–10 кВ. Полевые исследования случаев одно-

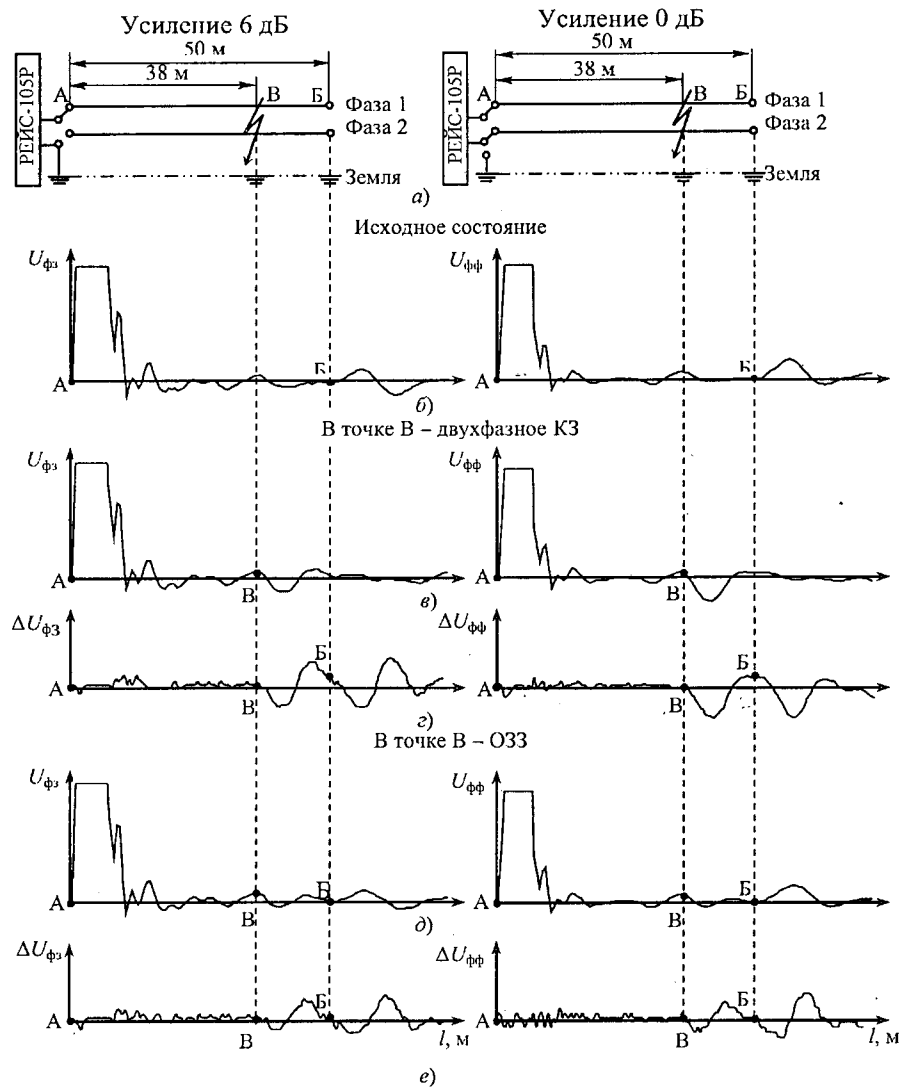


Рис. 2. Идентификация повреждений воздушной линии длиной 50 м в виде замыканий на расстоянии 38 м от начала линии при зондировании импульсом длительностью 0,042 мкс: *а* – схемы подключения рефлектометра; *б* – рефлектограммы линии в исходном состоянии; *в* – рефлектограммы при двухфазном КЗ; *з* – разность рефлектограмм *в* и *б*; *д* – рефлектограммы при ОЗЗ (грунт); *е* – разность рефлектограмм *д* и *б*

фазных замыканий на землю проводились на воздушных ЛЭП Пригородного РЭС Приволжских электрических сетей ОАО «Татэнерго». Искусственно создавались различные виды однофазных замыканий проводов на землю и двухфазные КЗ, затем полученные рефлектограммы сравнивались.

На обесточенном фидере № 10 подстанции «Аэропорт» напряжением 10 кВ и длиной 1425 м зондирование осуществлялось по схеме «фаза–фаза» импульсами длительностью $\tau=0,25$ мкс. На рис. 3,а показано схематическое изображение фидера № 10 с тремя ответвлениями на трансформаторные пункты, которые были отключены. Рефлектограмма линии в исходном состоянии представлена на рис. 3,б.

Замыкания различных видов создавались на расстоянии 690 м от начала линии в точке З.

На рис. 3,в приведена рефлектограмма $U(l)$ линии при двухфазном КЗ в точке З. В этой точке рефлектограммы, как и положено, появился отрицательный импульс. На рефлектограмме $U(l)$ после точки З видны импульсы, переотражённые от точек З и А. Ранее имевшийся в точке Ж на $U(l)$ (рис. 3,б) отражённый от разомкнутого конца линии положительный импульс отсутствует, так как зондирующий импульс не проходит через место КЗ.

На рис. 3,г и 3,д показаны рефлектограммы $U(l)$ при поочередном однофазном замыкании на землю проводов фазы 1 и фазы 2 соответственно. Эти рефлектограммы между собой практически не различаются, в точке З в обоих случаях виден отрицательный импульс, который по амплитуде почти равен импульсу, соответствующему двухфазному КЗ на рис. 3,в.

На рис. 3,е и ж приведены рефлектограммы $U(l)$ при поочередном замыкании на опору проводов фазы 1 и фазы 2 соответственно. Эти рефлектограммы похожи друг на друга, в точке З в обоих случаях тоже виден отрицательный импульс, но по амплитуде он несколько меньше, чем в случае ОЗЗ (рис. 3,г и д).

Можно сделать вывод, что рефлектограммы разных фазных проводов в одинаковых ситуациях не имеют различий, также нет различий между рефлектограммами при замыкании фазных проводов на землю или на опору.

При ОЗЗ часть энергии импульса проходит дальше по линии, поэтому на рефлектограммах $U(l)$ (рис. 3,з,д,е,ж) виден положительный импульс, отразившийся от разомкнутого конца линии в точке Ж (что не имеет места при двухфазном КЗ на рефлектограмме рис. 3,в). По данному признаку можно различать между собой случаи однофазных и двухфазных замыканий при локационном зондировании.

По сравнению с КЗ в месте ОЗЗ на рефлектограмме появляется импульс с небольшой амплитудой, обусловленной током малого значения и возникшей при этом небольшой неоднородностью. На рефлектограммах $U(l)$ линий с ответвлениями имеется большое количество отражённых и переотражённых импульсов различной амплитуды. Поэтому визуально выделить среди них импульс с небольшой амплитудой, обусловленной однофазным замыканием, не всегда удается.

В этой ситуации следует воспользоваться разностным методом. Применение этого ме-

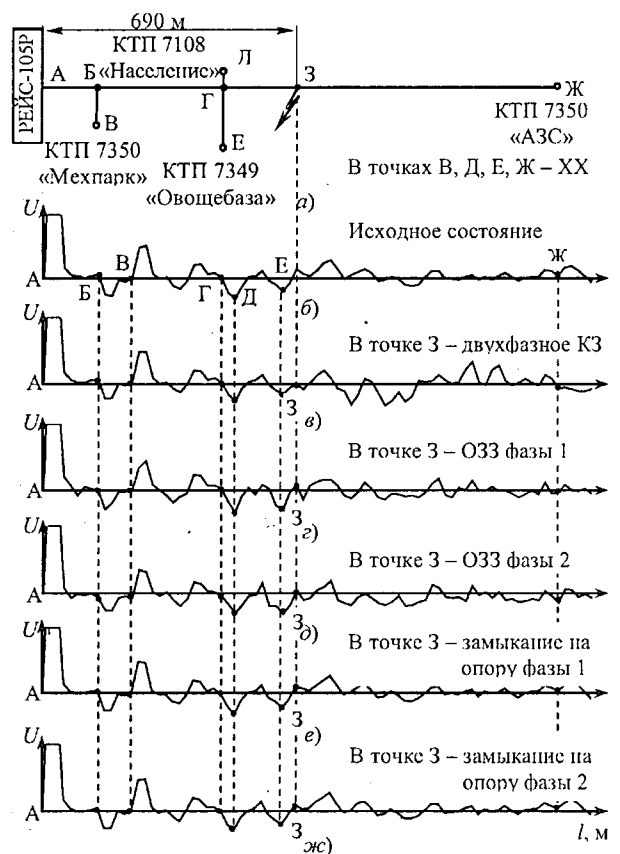


Рис. 3. Сравнение рефлектограмм двухфазного КЗ и однофазных замыканий на землю и на опору на расстоянии 690 м от начала линии напряжением 10 кВ длиной 1425 м с ответвлениями при зондировании импульсом длительностью 0,25 мкс: а – схема линии; б – исходное состояние; в – двухфазное КЗ; г, д – замыкания на землю фазы 1 и фазы 2 соответственно; е, ж – замыкания на опору фазы 1 и фазы 2 соответственно

тогда для определения ОЗЗ иллюстрируется измерениями на фидере № 14 подстанции «Нармонка» Приволжских электрических сетей (рис. 4). Зондирование осуществлялось рефлектометром РЕЙС-105Р по схеме «фаза–земля» импульсами $\tau=2$ мкс на линии напряжением 10 кВ и длиной 8000 м. Замыкания создавались на удалении 1600 м от начала линии.

Схематическое представление линии, имеющей 4 ответвления разной длины, показано на рис. 4,а. Рефлектограмма $U(l)$ линии в исходном состоянии изображена на рис. 4,б. Случаю однофазного замыкания на железобетонную опору соответствует рефлектограмма $U(l)$ (рис. 4,в). Визуальным сравнением этих рефлектограмм обнаружить место замыкания практически невозможно. Но на разностной рефлектограмме $\Delta U(l)$ (рис. 4,г) (из $U(l)$ (рис. 4,в) вычитаем $U(l)$ (рис. 4,б)) чётко видимый отрицательный импульс указывает место замыкания в точке П.

При ОЗЗ (глубина заземления 10 см) на основной рефлектограмме $U(l)$ (рис. 4,д) место замыкания визуально не обнаруживается. Однако отрицательный импульс на разностной рефлектограмме $\Delta U(l)$ (рис. 4,е) явно показывает место замыкания в точке П.

Найти видимые признаки ОЗЗ, когда провод лежит на земле, на рефлектограмме $U(l)$ (рис. 4,ж) также не удаётся. Но наличие большого отрицательного импульса на разностной рефлектограмме $\Delta U(l)$ (рис. 4,з) свидетельствует о повреждении линии в точке П.

Измерения на больших расстояниях, чем в предыдущем примере, были проведены на этом же фидере № 14 подстанции «Нармонка» (рис. 5,а).

Сравним разностным методом исходную рефлектограмму $U(l)$ на рис. 5,в (до возникновения замыкания) с эталонной рефлектограммой $U(l)$ на рис. 5,б, снятой ранее в штатном режиме. На разностной рефлектограмме $\Delta U(l)$ (рис. 5,г) резкие увеличения амплитуды сигнала не обнаруживаются, видна обычная шумовая дорожка, полученная при большом усилении разностного сигнала во время компьютерной обработки.

Но однофазные замыкания на опору в точке П (1600 м от начала линии) на рефлектограмме $\Delta U(l)$ (рис. 5,е) и в точке Р (6100 м от начала линии) на рефлектограмме $\Delta U(l)$ (рис. 5,з) распознаётся уверенно и однозначно по появлению отрицательных сигналов с

большой амплитудой на фоне шумовой дорожки.

Таким образом, хотя в большинстве случаев импульсы, соответствующие однофазным замыканиям на линиях с древовидной структурой, на основной рефлектограмме визуально не обнаруживаются, но место повреждения достоверно определяется разностным методом по наличию колебаний с большой отрицательной амплитудой на фоне сигналов шумовой составляющей. Импульс, обусловленный концом линии, в этом случае имеет небольшую амплитуду и теряется среди множества импульсов, отражённых от ответвлений, поэтому выделить его затруднительно.

Линии электропередачи напряжением 35 кВ и выше. Полевые опыты по определению ОЗЗ проводились на воздушной линии электропередачи напряжением 35 кВ, соединяющей подстанции «Балтаси» и «Ципья» Приволжских электрических сетей ОАО «Татэнерго». Длина линии 22000 м. Линия имела

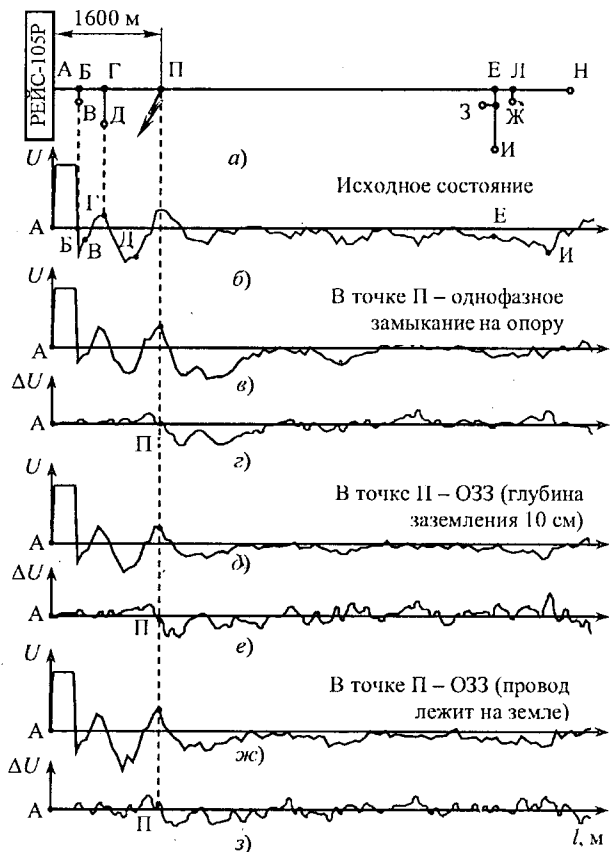


Рис. 4. Определение места повреждения разностным методом на расстоянии 1600 м от начала линии напряжением 10 кВ длиной 8000 м: а – схема линии; б – рефлектограмма линии в исходном состоянии; в – рефлектограмма линии при однофазном замыкании на опору; г – разность рефлектограмм в и б; д – рефлектограмма линии при ОЗЗ (глубина заземлителя – 10 см); е – разность рефлектограмм д и б; ж – рефлектограмма линии при однофазном замыкании на землю (провод лежит на земле); з – разность рефлектограмм ж и б

высокочастотную обработку и в месте зондирования была оборудована ВЧ заградителем (ВЗ) ЗВС-200, фильтром присоединения (Ф) УФП-75 с конденсатором связи (КС) СМП-66/ $\sqrt{3}$ -4650, которые в совокупности обеспечивали полосу пропускания частот от 105 до 600 кГц.

Основные параметры, установленные при зондировании на рефлектометре РЕЙС-105Р: длительность импульса $\tau=0,5$ мкс, усиление 6 дБ. Измерения осуществлялись по схеме «фаза–земля» с подключением рефлектометра через фильтр присоединения к проводу фазы С.

Первая серия измерений выполнялась на обесточенной линии, выведенной в ремонтное состояние. В точках Б, В, Г на расстояниях 900, 1900 и 6000 м от начала линии соответственно производились искусственные ОЗЗ (рис. 6,а).

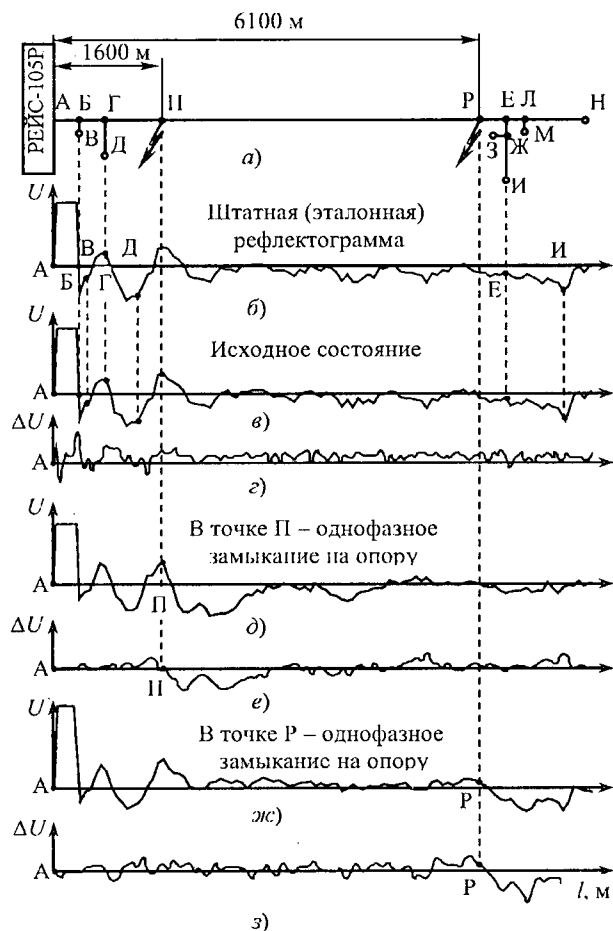


Рис. 5. Определение места однофазного замыкания на опору разностным методом на расстояниях 1600 и 6100 м от начала линии напряжением 10 кВ длиной 8000 м: а – схема линии; б – эталонная рефлектограмма линии; в – рефлектограмма линии в исходном состоянии; г – разность рефлектограмм в и б; д – рефлектограмма линии при замыкании на расстоянии 1600 м; е – разность рефлектограмм д и б; жс – рефлектограмма линии при замыкании на расстоянии 6100 м; з – разность рефлектограмм жс и б

На всех основных рефлектограммах $U(l)$ (рис. 6,в,д,ж) в точках ОЗЗ отчетливо видны отрицательные импульсы с сопутствующими колебаниями, которые обусловлены фильтрами присоединения. Такие же импульсы в этих же точках отчетливо обнаруживаются и на разностных рефлектограммах $\Delta U(l)$ (рис. 6,г,е,з). Естественно, с увеличением расстояния амплитуда отражённых импульсов из-за затухания уменьшается. Кратные импульсы на рефлектограммах практически не видны.

Вторая серия измерений проводилась на той же линии, но при наличии на ней рабочего напряжения 35 кВ. Было показано, что если в случае ОЗЗ на расстоянии 1900 м от начала линии из рефлектограммы, когда линия находится под напряжением, вычесть рефлектограмму, когда линия отключена от питающих шин, то на разности этих рефлек-

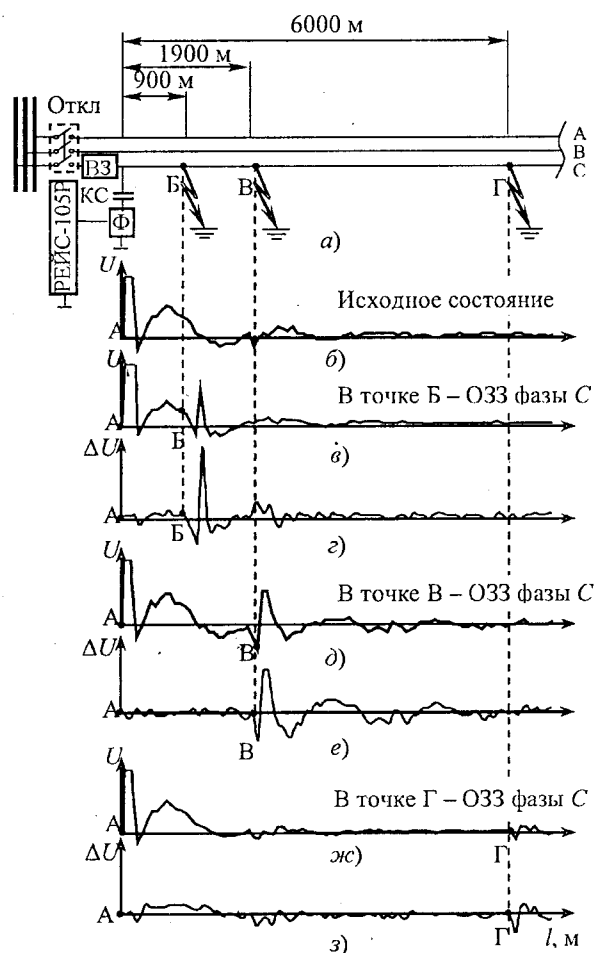


Рис. 6. Определение места однофазных замыканий на землю логическим и разностным методами на воздушной линии 35 кВ длиной 22000 м с ВЧ обработкой: а – схема линии; б – рефлектограмма линии в исходном состоянии; в, д, жс – рефлектограммы при ОЗЗ фазы С на расстояниях 900, 1900, 6000 м от начала линии соответственно; г, е, з – разность рефлектограмм в и б, д и б, жс и б соответственно

тограмм виден шумовой сигнал и существенных различий при наличии и отсутствии напряжения на линии нет.

Таким образом, различные виды ОЗЗ уверенно распознаются на рефлектограммах локационного зондирования, причём рефлектограммы, снятые при наличии или отсутствии на линии напряжения, не различаются.

Были организованы измерения на обесточенной воздушной линии 110 кВ, соединяющей подстанции «Рыбная Слобода» и «Камская» Приволжских электрических сетей длиной 29700 м (рис. 7,а). Рефлектометр РЕЙС-205 подключался к фильтру присоединения через ВЧ кабель (ВК) длиной 16 м. Были установлены следующие параметры зондирования: амплитуда импульса $U = 22$ В при длительности $\tau = 2$ мкс, усиление рефлектометра 6 дБ, количество усреднений равно 4. Однофазные замыкания и обрыв фазного провода искусственно создавались на расстояниях 6600, 17700 и 29700 м от начала линии.

Исходная рефлектограмма $U(l)$ представлена на рис. 7,б, в начале которой, в точке А, хорошо виден зондирующий импульс с сопутствующими флюктуациями, а в точке Г — остроконечный положительный импульс с колебаниями, отражённый от высокочастотного заградителя в конце линии на подстанции «Камская». Других значащих отражений, кроме шумового сигнала, на рефлектограмме не наблюдается. Этот факт дает основание утверждать, что воздушная линия цела и исправна.

На рефлектограмме $U(l)$ (рис. 7,в) в точке В виден чёткий отрицательный импульс с флюктуациями, который соответствует случаю ОЗЗ провода фазы А на расстоянии 6600 м от начала линии. При появлении в этом месте обрыва фазного провода импульс в точке В меняет свою полярность на положительную (рис. 7,з).

При ОЗЗ на расстоянии 17700 м от начала линии провода фазы А в точке В рефлектограммы $U(l)$ (рис. 7,д) также возникает отрицательный импульс, но с меньшей амплитудой из-за затухания сигнала. В конце линии, в точке Г, виден отразившийся от высокочастотного заградителя положительный импульс, который по амплитуде соразмерен с импульсом ОЗЗ. Кратные импульсы на рефлектограмме при ОЗЗ не обнаруживаются так четко, как в случае двухфазного КЗ. На основании этого признака импульсы ОЗЗ и КЗ можно различать между собой.

Если рефлектометр подсоединен к проводу фазы А, а ОЗЗ произошло, например, на соседней фазе С, то это событие тоже может быть зарегистрировано. Подтверждением этому является рефлектограмма $U(l)$ (рис. 7,е), на которой в точке В на удалении 17700 м от начала линии виден небольшой по амплитуде отрицательный импульс с сопутствующими колебаниями, явно выделяющийся на фоне сигналов шумовой составляющей. Этот импульс своим происхождением обязан части энергии зондирующего импульса, которая наводится с провода фазы А на провод фазы С. Импульс наведённой энергии распространяется по проводу фазы С, отражается от места ОЗЗ на проводе фазы С в точке В, находящейся на удалении 17700 м, возвращается обратно по проводу С, вновь наводится на провод фазы А и регистрируется рефлектометром. На этой же рефлектограмме присутствует положительный импульс, распространявшийся по проводу фазы

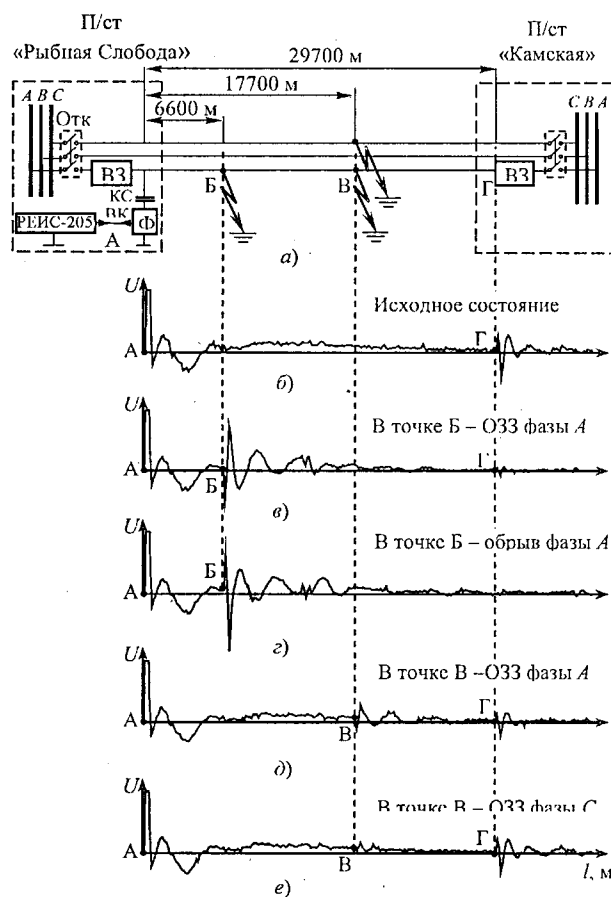


Рис.7. Определение места однофазных замыканий на землю и обрыва фазного провода логическим методом на воздушной линии 110 кВ длиной 29700 м с ВЧ обработкой: а – схема линии; б – рефлектограмма линии в исходном состоянии; в и з – рефлектограммы линии при ОЗЗ фазы А и обрыва фазного провода соответственно на расстоянии 6600 м от начала линии; д и е – рефлектограммы линии при ООЗ фазы А и ОЗЗ фазы С соответственно на расстоянии 17700 м

А и отразившийся от высокочастотного заградителя в конце линии в точке Г. Этот импульс по форме и амплитуде совпадает с таким же импульсом, отразившимся от конца линии и регистрируемым в точке Г на исходной рефлектограмме $U(l)$ (рис. 7,б).

Итак, метод локационного зондирования даёт возможность обнаруживать различные случаи ОЗЗ на воздушных линиях электропередачи с измерением расстояния до места события. Импульсы, соответствующие ОЗЗ, на рефлектограммах линий электропередачи напряжением 6–110 кВ выделяются надёжно и однозначно.

Выводы

1. Значение неоднородности волнового сопротивления, появляющейся при однофазном замыкании электрических проводов на землю, меньше, чем при двухфазном КЗ этих же проводов. Это обуславливает и меньшую амплитуду отражённого импульса.

2. Импульсы, отражённые от места ОЗЗ электрических проводов при всех его разновидностях, имеют отрицательную полярность и уверенно определяются на рефлектограммах импульсного зондирования, несмотря на меньшую, чем в случае двухфазного КЗ этих же проводов, амплитуду.

3. Рефлектограммы, полученные при раздельном зондировании каждого фазного провода трёхпроводной линии электропередачи при поочередном замыкании каждого из них на землю, одинаковы.

4. Надёжность и достоверность выделения импульсов, отражённых от места ОЗЗ в электролиниях с древовидной топологией, резко возрастает при использовании разностного метода для расшифровки рефлектограмм.

5. На рефлектограммах, снятых на линиях электропередачи с высокочастотной обработкой, зондирующий импульс и импульсы, отражающиеся от места повреждения и конца линии, сопровождаются затухающими синусоидальными колебаниями.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Приволжских электрических сетей ОАО «Татэнерго» и студентам Казанского государственного энергетического университета Р.Э. Абдуллазянову, А.Г. Латипову за помощь при выполнении измерений и их обработке.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971.
2. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1986.

3. Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1986.

4. Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. 2000. № 1. С. 20–22.

5. Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ // Новости электротехники. 2005. № 1. С. 73–75.

6. Шалыт Г.М. Определение мест повреждений линий электропередачи импульсным методом. М.: Энергия, 1968.

7. Минуллин Р.Г., Закамский Е.В. Определение мест повреждения в электрических сетях напряжением 6–35 кВ импульсным методом // Материалы докладов Российского национального симпозиума по энергетике. Казань: КГЭУ, 2001. Т. 2. С. 62–64.

8. Минуллин Р.Г. Методы и аппаратура определения мест повреждений в электросетях. Казань: ИЦ «Энергопрогресс», 2002.

9. Минуллин Р.Г., Закамский Е.В., Андреев В.В. Исследования условий отражения импульсных сигналов в распределительных сетях с древовидной топологией // Электротехника. 2003. № 10. С. 39–44.

10. Минуллин Р.Г., Закамский Е.В. Обнаружение повреждений в электрических распределительных сетях локационным методом. Казань: ООО «ИЦ Энергопрогресс», 2004.

11. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Физические основы диагностики повреждений воздушных линий распределительных электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. № 5–6. С. 43–47.

12. Фардиев И.Ш., Минуллин Р.Г., Закамский Е.В. и др. Диагностика воздушных линий распределительных электрических сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2004. № 7–8. С. 41–49.

13. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф., и др. Локационный мониторинг неоднородностей распределительных электрических сетей // Электротехника. 2006. № 5. С. 2–10.

Минуллин Ренат Гизатуллович – профессор кафедры релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем (РЗАЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), доктор техн. наук. Окончил в 1959 г. радиотехнический факультет Казанского авиационного института (КАИ). В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Прогностическая радиофизическая модель среднеширотного спорадического слоя E» в ИЗМИРАН.

Петрушенко Юрий Яковлевич – ректор КГЭУ, заведующий кафедрой механики КГЭУ, доктор техн. наук, проф. Окончил в 1973 г. самолетостроительный факультет КАИ. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Задачи о собственных колебаниях, устойчивости и нестационарного деформирования предварительно нагруженных статической нагрузкой составных слоистых оболочек сложной геометрии и численные методы их решения» в КАИ.

Фардиев Ильшат Шаехович – заведующий кафедрой РЗАЭС КГЭУ, профессор. Окончил в 1984 г. электроэнергетический факультет МЭИ.

Лукин Эдуард Ирикович – аспирант кафедры РЗАЭС КГЭУ. Окончил в 2007 г. электроэнергетический факультет КГЭУ.

Лукина Галина Валерьевна – инженер Приволжских электрических сетей ОАО «Татэнерго». Окончила в 2007 г. электроэнергетический факультет КГЭУ.

Практическая физико-химическая диагностика МНО в простейшей системе мониторинга

АРАКЕЛЯН В.Г.

Предложен алгоритм практических действий по физико-химической диагностике состояния электрооборудования в простейшей системе мониторинга на основе датчика влажности и датчиков температуры. Представление расчётных значений степени полимеризации, влажности, тангенса потерь и удельного сопротивления бумаги – параметров, являющихся критериальными, и ресурсных показателей, рассчитываемых по общему количеству воды в объекте и степени полимеризации бумаги, позволяет не только постоянно иметь важную техническую информацию о работе объекта, но и принимать правильные управленческие решения по распределению нагрузки на объект и по восстановлению его ресурса посредством технически эффективной и беззатратной процедуры осушки объекта.

Ключевые слова: мониторинг, физико-химическая диагностика, влажность бумаги, удаление воды, степень полимеризации, ресурс

Если с самого начала система мониторинга формировалась как система управления электротехническим объектом, то сейчас к этому активно добавляются функции диагностического контроля. Как и ожидалось [1, 2], с развитием систем мониторинга маслонаполненного оборудования (МНО) в её состав включаются каналы наблюдения и обработки физико-химических параметров. Физико-химический мониторинг надёжно занимает место в системе диагностического контроля (рис. 1).

Задачей любого вида диагностического контроля является определение состояния и прогнозирование работоспособности объекта, определение путей и средств продления или восстановления его работоспособности. Главной целью диагностического контроля является максимальное использование фактического ресурса и предотвращение аварийного отказа.

Диагностическое заключение формируется в соответствии со сводкой нормативных и критериальных параметров. В качестве критериев предельного физико-химического состояния МНО могут быть приняты: 1) сумма парциального давления газов и воды, 2) влажность твердой изоляции (в виде влагосодержания, фактора диэлектрических потерь или

The algorithm of practical actions on physico-chemical diagnostics of a condition of electric equipment in the simple system of monitoring is offered on the basis of the sensor of humidity and sensors of temperature. Representation of settlement values of a degree of polymerization, humidity, a tangent of losses and specific resistance of paper – the parameters being criterial, and the resource parameters, considered on total of water in object and a degree of polymerization of a paper, allows not only to have constantly the important technical information on work of object, but also to make correct management decisions on distribution of loading on object and on restoration of its resource by means of technically effective and without expensed procedure of dehumidification of object.

Key words: monitoring, physico-chemical diagnostics, humidity of water, degree of polymerization, resource

удельного сопротивления) [3–5] и 3) степень полимеризации целлюлозы как основной составляющей твердой изоляции. Эти показатели определяют ресурс электротехнического объекта.

Сегодня рынок предлагает большое количество приборов для непрерывного контроля содержания газов и влаги, оснащённых программами диагностики состояния изоляции. Это дорогие приборы, но и роль их в системе диагностического контроля велика. Эти приборы позволяют на ранней стадии идентифицировать развивающийся дефект. Однако один из самых главных показателей качества твердой изоляции – степень полимеризации целлюлозы – остается недоступным.

Сегодня можно констатировать, что уровень развития научного познания в этой области достиг такого состояния, что этот параметр может непосредственно рассчитываться и, соответственно, ресурс твердой изоляции – надёжно прогнозироваться. Для этого необходимо в системе мониторинга располагать тремя каналами информации: температуры и влажности верхних слоёв масла, реализуемых, как правило, в одном совмещённом тонкоплёночном датчике, и температуры масла около адсорбционного фильтра (или после холодильника).



Рис. 1. Структура диагностического контроля

Работающий электротехнический объект можно рассматривать как псевдоравновесную систему. Меняющаяся температура приводит к непрерывному изменению состояния системы, и установление полного равновесия в ней практически невозможно. Но стремление к достижению равновесия определяет следование её за температурным дрейфом. Скорость дрейфа температуры невелика из-за инерционности масс (бумаги, масла), наличие которых значительно сглаживает даже резкие скачки нагрузки. С учётом цикличности нагрузки и температуры окружающей среды при нивелирующем влиянии инерционных масс систему электротехнического объекта можно рассматривать как приближающуюся к равновесной с некоторой задержкой, причём задержка в масштабе диагностических категорий ничтожна.

Наличие датчиков температуры и влажности в псевдоравновесной системе электротехнического объекта позволяет решать две из трёх критериальных физико-химических задач диагностики: определение влажности твёрдой изоляции (в виде влагосодержания, фактора диэлектрических потерь и удельного сопротивления) и определение степени полимеризации бумажной изоляции обмотки. Решение и той, и другой задач позволяет получить ответ на главный вопрос: о ресурсе оборудования по этим показателям.

Предлагаемое решение может быть приложено к любому электротехническому объекту, но для упрощения мы рассмотрим эту задачу применительно к трансформатору с принудительной циркуляцией масла. Входными параметрами для расчёта являются температура верхних слоёв масла $t_{в.м}$ (°C), соответствующая ей относительная влажность φ_t газовой фазы над верхними слоями масла, напрямую регистрируемая опущенным в масло датчиком влажности, калиброванным по парам воды (вне зависимости от отсутствия или наличия газовой фазы), и температура масла около адсорбера $t_{ад}$ (нижнее значение температуры масла), а также вводимые в ручном режиме данные оперативной диагностики: концентрация кислорода, концентрация антиоксиданта и кислотное число.

Определение параметров влажности твёрдой изоляции

Глубокое понимание форм существования воды в изоляционных материалах электрооборудования (маслах и бумагах) позволило сформулировать уравнения, связывающие параметры влажности разных частей изоляционной системы [3–5]. В задачу расчёта входит:

1) определение текущих значений влажности, фактора диэлектрических потерь и удельного объёмного сопротивления бумаги с целью сравнения с предельно допустимыми значениями (табл. 1);

2) определение состояния адсорбента;
 3) определение допустимой нижней границы температуры масла, связанное с необходимостью вывода электротехнического объекта из эксплуатации на длительный срок; допустимой нижней границей будем считать температуру системы, при которой влажность бумажной изоляции не превысит предельно допустимого значения, что, в свою очередь, снизит уровень проблем при повторном запуске.

Получаемая информация позволяет принять важные и правильные управленческие решения.

Расчёт параметров влажности выполняется каждую минуту. Для этого ежесекундные измерения показания датчиков усредняются до ежеминутных значений.

Комплекс уравнений для расчёта¹:
 давление пара воды (мм Нг)

$$p_{H_2O} = \varphi_t 10^{8,0589 - 1729,9875/(t+233,856)}; \quad (1)$$

предельное влагосодержание масла (мг/кг)

$$H^* = 106,41 - 1217/(t+233,856); \quad (2)$$

влагосодержание масла (мг/кг)

для $t < 40^\circ\text{C}$ и $\varphi \geq 0,2$

$$H = H^* \frac{C\varphi^{\alpha/\beta}}{1 + (C-1)\varphi^{\alpha\beta\varphi}}; \quad (3a)$$

где $\alpha/\beta = 10^{-0,85458 + 0,02742t/(1+10^{-0,85458 + 0,02742t})}$;
 $\beta = 2010^{-2,0904 + 0,03808t/(1+10^{-2,0904 + 0,03808t})}$;

$\alpha\beta = (\alpha/\beta)\beta^2$;

$C = 10^{-0,9707 + 0,02622t/(1+10^{-0,9707 + 0,02622t})}$

для $t > 40^\circ\text{C}$ и $\varphi < 0,2$

$$H = \varphi H^* \frac{1,147 - 0,025t}{0,032 + 0,003t + \varphi}; \quad (3b)$$

влажность целлюлозной изоляции (%) для $\varphi < 0,3$

$$W = Ae^{-Bt} p_{H_2O}^{k+at}; \quad (4)$$

концентрация воды в газовой фазе (г/м³)

$$c_r = 0,98529 p_{H_2O}; \quad (5)$$

адсорбция воды на силикагеле типа КСК (в граммах на грамм сухого силикагеля) для $\varphi < 0,6$

$$\alpha_{H_2O} = \frac{1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520t}}{4,748 + 0,925/\varphi}; \quad (6a)$$

для $1 \geq \varphi \geq 0,6$

$$\alpha_{H_2O} = 1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520/T} \varphi^{10\varphi^2}; \quad (6b)$$

количество воды в системе (кг)

$$G = 10^{-3} HQ_M + 10WQ_6 + 10^{-3} c_r V_r + \alpha_{H_2O} Q_{ад}; \quad (7)$$

тангенс угла диэлектрических потерь бумаги

$$\text{tg}\delta = (p + qW^r) \exp(-2700/T); \quad (8)$$

удельное объёмное сопротивление бумаги (Ом·м)

$$\rho_v = s \exp[h/T - n(W - m)^d]; \quad (9)$$

динамика роста влажности бумаги

$$M = (W - W_{\text{пред}}) / \tau; \quad (10)$$

динамика роста влагосодержания объекта

$$N = (G - G_{\text{пред}}) / \tau; \quad (11)$$

где T и t – температура, К и $^\circ\text{C}$, Q_M , Q_6 , – количество масла и бумаги, τ ; $Q_{ад}$ – количество адсорбента (силикагеля), кг; V_r – объём газового пространства, м³; τ – интервал времени от предыдущего до текущего момента измерения, ч; N и M – константы, определяемые в процессе мониторинга по рассчитанному текущему и предыдущему значениям G и W , остальные – константы, приведённые в таблицах 2 и 3.

Таблица 1

Предельно допустимые значения для маслопропитанной бумажной изоляции высоковольтного электрооборудования²

Критерий	Конденсаторы	Прочее оборудование
Влажность бумаги, % не более	3	4
Фактор диэлектрических потерь, не более	0,016	
Удельное объёмное сопротивление, Ом·м, не менее	2·10 ⁹	

¹ Все уравнения приводятся без объяснений и ссылок, поскольку они в полном объёме изложены в статьях, ссылки на которые здесь приведены.

² Дается как пример. Эти вопросы должны решать специалисты.

Таблица 2
Эмпирические коэффициенты для расчёта влажности целлюлозных материалов по уравнению (4)

Целлюлозный материал	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>k</i>	<i>a</i>
Кабельная бумага К-120	6,10	0,040	0,33	0,0033
Конденсаторная бумага КОН-2-10	4,50	0,033	0,495	0,0005
Конденсаторная бумага "Силкон"	5,60	0,032	0,48	0
Конденсаторная бумага "Терокс С-1"	9,40	0,044	0,48	0
Конденсаторная бумага "Терокс С-0,8"	8,20	0,04	0,40	0,0011
Электротехнический картон "ЭМЦ"	5,55	0,034	0,49	-0,0007
Электротехнический картон "А"	4,02	0,032	0,55	-0,0010
Электротехнический картон "В"	3,74	0,032	0,63	-0,0017

Таблица 3
Эмпирические коэффициенты для расчета тангенса диэлектрических потерь и удельного сопротивления бумаги по уравнениям (8) и (9)

Коэффициент	Целлюлозный материал	
	Кабельная бумага К-120	Конденсаторная бумага КОН-2-10
<i>p</i>	2,68	3,8
<i>q</i>	6	7
<i>r</i>	1,85	2,3
<i>s</i>	2,7·10 ⁵	1,4·10 ⁶
<i>h</i>	5800	5600
<i>n</i>	2,8	2,3
<i>m</i>	0,1	0,03
<i>d</i>	0,8	1

Дополнительного пояснения к ранее изложенному требует только закон распределения воды между влагоносителями в системе принудительно циркулирующего масла. Закрытую (замкнутую) систему трансформатора можно трактовать как совокупность сообщающихся открытых систем, где транспортную функцию выполняет циркулирующее масло (смотри схему на рис. 2). Масло, нагретое токоведущими и магнитопроводящими частями до температуры $t_{в.м}$, поступает в холодильник, где охлаждается до температуры $t_{ад}$. В условиях установившегося равновесия (при постоянных значениях температуры

$t_{в.м}$ и $t_{ад}$) влагосодержание масла H в любой точке системы циркуляции будет одинаково³. При этом изменяться будет лишь соотношение растворённой, физически связанной и диспергированной воды в масле. Для каждого значения температуры отдельных частей системы будет соответствовать свое значение предельного влагосодержания масла H^* и давления насыщенных паров воды. Переход от низкой температуры к более высокой определит повышение парциального давления водяных паров, снижение относительного влагосодержания масла (H/H^*) и относительной влажности газовой фазы (вне зависимости от её наличия или отсутствия). В точке низкой температуры к системе примыкает адсорбционный фильтр. Его влагоёмкость будет определяться влагосодержанием масла H и температурой масла в этой точке ($t_{ад}$). В точке высокой температуры к системе примыкает нагретая обмоткой бумага с температурой t_6 , которая будет выше $t_{в.м}$. Влажность бумаги будет определяться влагосодержанием масла H и температурой масла в этой точке (t_6).

Если есть газовая фаза, то расчёт её влагосодержания производится аналогичным образом, но с учётом того, что в отсутствие конденсации постоянным в разных температурных участках газовой фазы поддерживается парциальное давление водяных паров.

Порядок расчёта:

1. По температуре $t_{в.м}$ и нагрузке с учетом конструкции определить t_6^4 .
2. По $t_{в.м}$ и φ_t рассчитать p_{H_2O} (1), H^* (2), H [(3а) или (3б)] и H/H^* для $t_{в.м}$.
3. По t_6 рассчитать H^* (2), H/H^* для t_6 .
4. По (3) подобрать φ , обеспечивающее получение значения H/H^* для t_6 .
5. По t_6 и φ_{t_6} рассчитать p_{H_2O} (1).
6. По t_6 и p_{H_2O} при t_6 рассчитать W (4). Среднее установившееся значение влажности бумаги, полученное за первые сутки работы системы мониторинга, воспринимается как W_0 . Далее программа по получаемым значениям W рассчитывает M (10), средние значения за 15 мин \underline{M} и \underline{W} и среднее значение $\underline{\underline{M}}$ за весь период наблюдения.

³ Для естественной циркуляции в точках разных значений температуры $C_{H_2O}^* = \text{const}$, где $C_{H_2O}^*$ – истинная растворимость воды в изоляционном масле при заданной температуре [3].

7. Если есть газовая фаза, то по p_{H_2O} для $t_{в.м}$ рассчитать c_r (5). (Вклад этой составляющей в материальный баланс воды незначителен).

8. Повторить шаги 3 и 4 для $t_{ад}$.

9. По $t_{ад}$ и $\varphi_{t_{ад}}$ рассчитать a_{H_2O} (6а или 6б).

10. Рассчитать количество воды G в трансформаторе (7). Среднее установившееся значение G , полученное за первые сутки работы системы мониторинга, принимается как G_0 . Далее программа рассчитывает N (11) и среднее значение \bar{N} за весь период наблюдения.

11. Рассчитать $tg\delta$ (8) и ρ_v (9) для t_6 и сравнить с данными таблицы 1.

12. Определить нижний предел температуры для остановленного на длительный срок объекта⁵: задать предполагаемое значение температуры t_{min} , повторить шаги 3–9 для $t_{min} = t_{в.м} = t_6 = t_{ад}$. Повторять расчёт до получения нормативного значения W для зафиксированного значения G .

Определение степени полимеризации целлюлозы

Научная основа деполимеризации целлюлозы применительно к маслопропитанной целлюлозной изоляции изложена в [6, 7]. Принятие простого линейного уравнения зависимости энергии активации разрыва гликозидной связи от обратного значения степени полимеризации позволило получить простую форму зависимости степени полимеризации от времени и многих сопровождающих процесс старения параметров. В задачу расчёта входит:

1) определение текущей степени полимеризации целлюлозного материала,

2) определение остаточного ресурса (времени) до достижения предельного значения степени полимеризации для усреднённых за весь предыдущий период параметров работы объекта и для любых предположительных условий эксплуатации в будущем.

Интервал времени между расчетами значений степени полимеризации бумаги расширен до 15 мин (0,25 ч).

Комплекс уравнений для расчета:

$$e^{b/СП} - e^{b/СП_{пр}} = (Ab/B)(e^{Br_{сп}} - 1) \quad (12)$$

при $W \leq 3W_M$,

откуда

$$СП = \frac{b}{\ln[(Ab/B)(e^{Br_{сп}} - 1) + e^{b/СП_{пр}}]}, \quad (13)$$

где СП – степень полимеризации в текущий момент времени; $СП_{пр}$ – степень полимеризации в предыдущий момент времени; $\tau_{сп} = 0,25$ – интервал времени между измерением $СП_{пр}$ и СП, ч,

$$A = \Psi e^{0,5(3W_M - W)\varphi_{O_2}} k_{осн} \cdot 10^{8+0,38W} e^{-Q_0 L / (RT)}, \quad (14)$$

$$B = (0,875 - 0,5\varphi_{O_2}) M; \quad (15)$$

$$b = 200\Delta QL / (RT); \quad (16)$$

$$L = e^{0,00079T}; \quad (17)$$

T – абсолютная температура бумаги; M – скорость роста влажности бумажной изоляции, %/ч, усредненная за пятнадцатиминутный интервал; φ_{O_2} – относительное содержание кислорода, равное концентрации кислорода в масле (независящей от температуры), поделённой на предельное содержание кислорода при данной температуре,

$$\varphi_{O_2} = 10^{-6} c_{O_2}^M / 10^{-0,2542 - 141,1923/T} \quad (\text{масло ГК}), \quad (18)$$

$c_{O_2}^M$ – концентрация кислорода в масле, мкл/л (результат анализа масла); Ψ – коэффициент, учитывающий степень изношенности масла, по уравнениям:

для ингибированного масла

$$\Psi = 0,5 - 0,11 \frac{(c_{ант} - c_{мин}^{ант})}{(c_{нор}^{ант} - c_{мин}^{ант})} + \frac{KЧ - KЧ_{нор}}{KЧ_{доп} - KЧ_{нор}}; \quad (19a)$$

для неингибированного масла

$$\Psi = 1 + \frac{KЧ - KЧ_{нор}}{KЧ_{доп} - KЧ_{нор}}, \quad (19б)$$

где $KЧ_{доп}$, $c_{мин}^{ант}$, $KЧ_{нор}$, $c_{нор}^{ант}$ – допустимое для старого и нормативное для нового изоляционно-масла значения кислотного числа и концентрации антиоксиданта (табл. 4); W – влажность

⁵ Рассчитывать верхний предел температуры, при котором будут достигнуты предельные параметры фактора потерь и проводимости бумаги, нецелесообразно: это будет отслежено непосредственно датчиками.

бумаги в текущий момент измерения, усредненная за пятнадцатиминутный интервал; W_M — влажность бумаги при заполнении монослоя, по уравнению в табл. 5; $k_{осн}$ — определяется основной бумаги: для крафт — 1, для хлопковой — 0,3; $Q_0 = 147$ и $\Delta Q = 9,7$ кДж/моль.

Таблица 4

Нормативные и предельно допустимые значения концентрации антиоксиданта и кислотного числа для трансформаторного масла^б

Показатель	Нормативное значение (для нового)	Допустимое значение в эксплуатации
Концентрация антиоксиданта, %	$c_{нор}^{ант} = 0,5$	$c_{мин}^{ант} = 0,2$
Кислотное число, мг КОН/г масла	$KЧ_{нор} = 0,01$	$KЧ_{доп} = 0,25$

Таблица 5

Коэффициенты уравнения $W_M = -A + B / T$ для расчета влажности бумаги (в %) при заполнении монослоя для трёх типов изделий из бумаги [8]

Тип целлюлозного материала	A	B
Кабельная бумага К-120	2,7547	2114,7
Картон ЭМЦ	5,1544	2184,3
Конденсаторная бумага КОН-2	3,1154	2893,8

Деструкция бумаги зависит от температуры и влажности, а также от кислотного числа и наличия антиоксиданта, что отражено в уравнениях (19). Опыт показывает, что внутренние слои бумаги, имеющие непосредственный контакт с горячим медным проводником, стареют быстрее. Более опасным представляется старение внешних слоёв, так как они могут отщепиться и преградить путь маслу, а при динамическом ударе оторваться мелкой крошкой. По мере старения изоляционного масла увеличивается скорость старения внешних слоёв бумаги за счёт адсорбции продуктов окисления масла. Тем самым в какой-то мере скорость старения бумаги по слоям выравнивается.

^б Дается как пример. Эти вопросы должны решать специалисты применительно к конкретному оборудованию.

Концентрация кислорода в масле $c_{O_2}^M$, концентрация антиоксиданта $c^{ант}$ и кислотное число КЧ по данным предпускового обследования или оперативной диагностики принимаются постоянными на весь период до получения следующего результата. При получении следующего результата программа в автоматическом режиме производит пересчёт всех результатов за этот период в соответствии с линейным графиком изменения этих параметров во времени.

Предельно допустимое значение степени полимеризации целлюлозного материала принимается равным 250.

Порядок расчета.

1. По температуре $t_{в.м}$ и нагрузке с учетом конструкции определить t_6 .

2. По t_6 рассчитать влажность монослоя W_M (табл. 5).

3. По t_6 и $c_{O_2}^M$ рассчитать относительную концентрацию кислорода в масле O_2 (18).

4. По результатам анализа масла ($c^{ант}$ и КЧ) и принятых нормативных значений рассчитать (табл. 4, уравнения 19а или 19б).

5. Принять $k_{осн}$.

6. Рассчитать L (17).

7. По имеющимся \underline{W} и \underline{M} рассчитать A (14), B (15), b (16) и текущее значение СП (13). (Если рассчитанное значение $\underline{M}=0$, то в расчёт берётся предыдущее значение \underline{M}).

Ресурсы в системе физико-химического мониторинга

Для оценки ресурсных показателей программа постоянно рассчитывает усреднённые параметры эксплуатации объекта. Эти параметры необходимы для расчета вероятного остаточного ресурса объекта по физико-химическим показателям. Остаточный ресурс может быть рассчитан также для любых предложенных оператором условий.

Ресурс по количеству воды в объекте [3] без адсорбента

Текущее значение количества воды в системе G и среднее значение N постоянно рассчитывается и представляется на экране. Начальное количество воды в системе G_0 было зарегистрировано в первые сутки работы объекта. Исходя из значения предельно допустимой влажности бумаги (табл. 1), мало зависящей от температуры в данном случае, поскольку количество воды в газовой фазе и масле сравнительно мало, рассчитываем максимально допустимое количество воды в бу-

маге $G_{\text{доп}}$, практически равное общему количеству воды в объекте.

Остаточный ресурс рассчитывается по уравнениям:

в материальном выражении (%)

$$r_{\text{ост}} = 100(G_{\text{доп}} - G) / (G_{\text{доп}} - G_0); \quad (20)$$

во временном выражении (час)

$$r_{\text{ост}} = (G_{\text{доп}} - G) / \underline{N}. \quad (21)$$

Ресурс по количеству воды в объекте [3] при наличии адсорбента

При наличии адсорбента вода мигрирует от адсорбента к бумаге и обратно в зависимости от температуры. Поэтому в расчёт принимаются усредненные условия эксплуатации за весь период наблюдения из предположения, что такой режим эксплуатации будет характерен для данного объекта до конца эксплуатации. Исходя из значения предельно допустимой влажности бумаги (табл. 1), рассчитывают $G_{\text{доп}}$ (уравнения (1)–(7), см. примеры 1 и 2). Далее по уравнениям (20) и (21) определяют ресурсы. Полученное значение ресурса времени можно воспринимать как предел, до наступления которого следует сменить адсорбент для частичного восстановления ресурса объекта.

Ресурс по степени полимеризации

Остаточный ресурс рассчитывается по уравнениям:

в материальном выражении (%)

$$r_{\text{ост}} = 100(\text{СП} - 250) / (\text{СП}_0 - 250); \quad (22)$$

во временном выражении (ч) в соответствии с уравнением 12

$$r_{\text{ост}} = \ln[e^{b/250} - e^{b/\text{СП}}] / (Ab + 1) / B. \quad (23)$$

Выходные параметры, представляемые на экране соответствующей странички программы

Текущие значения: данные датчиков $t_{\text{в.м}}$, φ_t , $t_{\text{ад}}$, данные расчета t_6 , W , $\text{tg}\delta$, ρ_v , H , G_0 , G и СП. Максимальное достигнутое значение t_6 , (время, число, год), усредненные значения за весь период эксплуатации $t_{\text{в.м}}$, t_6 , $t_{\text{ад}}$, \underline{N} , \underline{M} . Остаточный ресурс по количеству воды (% и год) в расчёте на усреднённые значения $t_{\text{в.м}}$, t_6 , $t_{\text{ад}}$, \underline{N} , \underline{M} и последние значения H , φ , $c_{\text{O}_2}^M$, $c_{\text{ант}}$ и КЧ. Остаточный ресурс по СП (% и год) в расчёте на усреднённые

значения $t_{\text{в.м}}$, t_6 , $t_{\text{ад}}$, \underline{N} , \underline{M} и последние значения H , φ_t , $c_{\text{O}_2}^M$, $c_{\text{ант}}$ и КЧ. Остаточный ресурс по количеству воды (% и год), по запросу на заданные значения. Остаточный ресурс по СП (% и год), по запросу на заданные значения. Текущие значения количества воды в масле, бумаге, адсорбенте, относительная влажность в адсорбенте $\varphi_{\text{ад}}$ как предупреждение о возможности образования свободной вод. Возможность графического представления любого параметра в любом диапазоне текущего времени.

Примеры расчёта типичного трансформатора с 12 т бумаги (типа К-120, СП₀=1000), 35 т масла и 300 кг силикагеля, надмасляное пространство 1 м³, принудительная циркуляция и охлаждение масла.

Расчет параметров влажности

Пример 1. Исходные данные, показания датчиков: температура верхних слоёв масла, $t_{\text{в.м}} = 60$ °С; относительная влажность, $\varphi_t = 0,1395$; температура охлаждённого масла (около адсорбера), $t_{\text{ад}} = 23$ °С.

1. Оцениваем температуру бумаги: $t_6 = 75$ °С.

2. Для 60 °С и $\varphi_t = 0,1395$:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1395 \cdot 10^{8,0589 - 1729,9875 / (60 + 233,856)} = 20,7147 \text{ мм Hg};$$

$$H_* = 10^{6,41 - 1217 / (60 + 233,856)} = 185,5734 \text{ мг/кг};$$

для $t > 40$ °С

$$\alpha / \beta = 10^{-0,85458 + 0,0274260 / (1 + 10^{-0,85458 + 0,0274260})} = 0,8606;$$

$$\beta = 20 \cdot 10^{-2,0904 + 0,0380860 / (1 + 10^{-2,0904 + 0,0380860})} =$$

$$12,2015; \alpha\beta = (\alpha / \beta)\beta^2 = 128,1232128, 1232;$$

$$C = 10^{-0,9707 + 0,0262260 / (1 + 10^{-0,9707 + 0,0262260})} = 0,8002;$$

$$H = 185,5734 \frac{0,8002 \cdot 0,1395^{0,8606}}{1 + (0,8002 - 1) \cdot 0,1395^{128,12320,1395}} =$$

$$= 27,2606 \text{ мг/кг}; H/H_* = 27,2606 / 185,5734 = 0,1469.$$

3. Для 75 °С:

$$H_* = 10^{6,41 - 1217 / (75 + 233,856)} = 294,8848 \text{ мг/кг};$$

$$H/H_* = 27,2606 / 294,8848 = 0,0924;$$

$$\alpha / \beta = 10^{-0,85458 + 0,0274275 / (1 + 10^{-0,85458 + 0,0274275})} = 0,9409;$$

$$\beta = 20 \cdot 10^{-2,0904 + 0,0380875 / (1 + 10^{-2,0904 + 0,0380875})} =$$

$$17,0713; \alpha\beta = (\alpha / \beta)\beta^2 = 274,2060;$$

$$C = 10^{-0,9707 + 0,0262275 / (1 + 10^{-0,9707 + 0,0262275})} =$$

$$= 0,9083; 0,0924 = \frac{0,9083 \varphi^{0,9409}}{1 + (0,9083 - 1)\varphi^{274,2060}}; \text{ отсюда}$$

$$\varphi_{75} = 0,0881.$$

При $\varphi_{75} = 0,0881$
 $\rho_{H_2O} = 0,0881 \cdot 10^{8,0589-1729,9875/(75+233,856)} = 25,2697$ мм Hg.

при $\rho_{H_2O} = 25,2697$ мм Hg
 $W = 6,1e^{-0,0475 \cdot 25,26970,33+0,0033 \cdot 75} = 1,9609\%$
 (норматив не превышен).

4. Для 60 °С:

$c_r = 0,98529 \cdot 20,7147 = 20,4100$ г/м³

5. Для 23 °С (ожидается высокое значение φ):

$H^* = 106,41 - 1217/(23+233,856) = 46,9826$ мг/кг;
 $H/H^* = 27,2606/46,9826 = 0,5802$; $\alpha/\beta = 0,3739$;
 $\beta = 1,1501$; $\alpha\beta = 0,4946$; $C = 0,3002$;

$0,5802 = \frac{0,3002\varphi^{0,3739}}{1+(0,3002-1)\varphi^{0,4946}}$; отсюда $\varphi_{23} =$

0,5286;

при $\varphi_{23} = 0,5286$
 $a_{H_2O} = \frac{1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520/(23+273,15)}}{4,748 + 0,925/0,5286} = 0,09924$ г/г.

6. $G = 10^{-3} H Q_M + 10 W Q_6 + 10^{-3} c_r V_r + a_{H_2O} Q_a =$
 $= 10^{-3} \cdot 27,2606 \cdot 35 + 10 \cdot 1,9609 \cdot 12 + 10^{-3} \cdot 20,4100 \cdot 1 +$
 $+ 0,09924 \cdot 300 = 266,0545$ кг.

Общее количество воды в трансформаторе составляет 266,055 кг, из них 235,308 кг в бумаге и 29,772 кг в адсорбере.

7. $tg\delta = (2,68 + 6 \cdot 1,9609^{1,85}) e^{-2700/(75+273,15)} = 0,0101$ (норматив не превышен)

$\rho_v = 2,7 \cdot 10^5 \exp[5800/(75+273,15) - 2,8(1,9609 - 0,1)^{0,8}] = 4,65 \cdot 10^{10}$ Ом·м (норматив не занижен).

Полученные результаты отражены на схеме (рис. 2).

Пример 2. Исходные данные: $t_{в.м} = 60$ °С, $\varphi_t = 0,3500$, $t_{ад} = 33$ °С.

Расчет (в кратком изложении).

Температура бумаги: $t_6 = 75$ °С.

Для 60 °С: $\rho_{H_2O} = 51,9725$ мм Hg; $H^* = 185,5734$ мг/кг; $H^2 = 60,1643$ мг/кг; $H/H^* = 0,3242$, $c_r = 51,2080$ г/м³;

для 75 °С: $H^* = 294,8848$ мг/кг; $H/H^* = 0,2040$; $\varphi_{75} = 0,2045$; $\rho_{H_2O} = 58,6567$ мм Hg; $W = 3,1890\%$ (норматив не превышен);

для 33 °С: $H^* = 70,7112$ мг/кг; $H/H^* = 0,85085$; $\varphi_{33} = 0,96263$, $a_{H_2O} = 0,3431$ г/г.

Общее количество воды в трансформаторе составляет 487,767 кг, из них 382,680 кг в бумаге и 102,930 кг в адсорбере.

$tg\delta = 0,0231$ (норматив превышен), $\rho_v = 4,66 \cdot 10^9$ Ом·м (норматив не занижен).

В примере 2 наблюдается превышение допустимого значения фактора потерь бумаги. Это не могло быть неожиданностью для персонала, так как увеличение значения фактора потерь происходило постепенно и было отмечено системой мониторинга до момента наступления критического значения. Персонал имел возможность принять меры к недопущению критической ситуации: снизить температуру охладителя или изменить нагрузку на трансформатор, причём результат предполагаемых действий оператор может увидеть сразу же на экране, задав те или иные параметры для модельного расчёта.

В примере 2 следует обратить внимание на то, что отключение адсорбера от системы в этот момент намного сократило бы количество воды в системе, а дальнейшая замена адсорбента позволила бы освободить трансформатор от примерно $(0,3431 - 0,005) \cdot 300 = 100$ кг воды. Освобождение от воды было

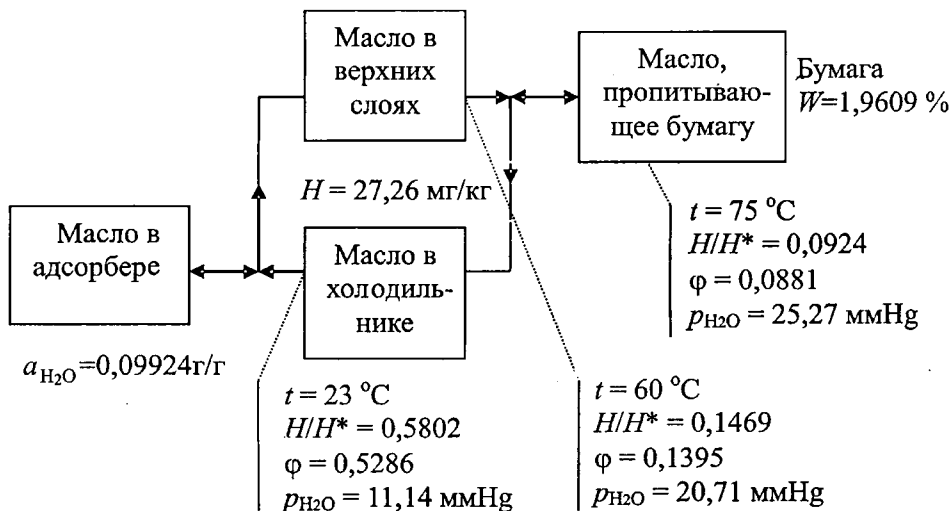


Рис. 2. Схема распределения параметров влажности в основных узлах трансформатора с принудительной циркуляцией (по данным расчёта, приведённого в примере 1)

бы ещё более существенным, если бы перед этим эффективность охлаждения и нагрузка были бы повышены (пример 3).

Пример 3 (поиск оптимального решения). Исходные данные: $G = 487,767$ кг (по текущим данным мониторинга), предполагаемые рабочие параметры $t_{в.м} = 70$ °С (увеличение нагрузки), $t_{ад} = 23$ °С (увеличение интенсивности охлаждения в холодное время суток или года).

Оцениваем температуру бумаги: $t_6 = 88$ °С.

Для 70 °С:

$$\rho_{H_2O} = \varphi_{70} \cdot 10^{8,0589-1729,9875/(70+233,856)} = \varphi_{70} \cdot 231,982 \text{ мм Нг}; H_{70}^* = 253,988 \text{ мг/кг};$$

для $t > 40$ °С $\alpha/\beta = 0,9207$; $\beta = 15,7984$; $\alpha\beta = 229,7974$; $C = 0,8799$;

$$H = 253,988 \frac{0,8799 \cdot \varphi_{70}^{0,9207}}{1 + (0,8799 - 1)\varphi_{70}} \text{ мг/кг};$$

$$c_T = 0,98529 \cdot \varphi_{70} \cdot 231,982 \text{ г/м}^3;$$

Для 88 °С:

$$\rho_{H_2O} = \varphi_{88} \cdot 10^{8,0589-1729,9875/(88+233,856)} = \varphi_{88} \cdot 482,9097 \text{ мм Нг}; H_{88}^* = 425,4083 \text{ мг/кг};$$

$$W = 6,1e^{-0,0488} (\varphi_{88} \cdot 482,9070)^{0,33+0,003388} \%;$$

Для 23 °С:

$$H_{23}^* = 46,9826 \text{ мг/кг из предположения, что } \varphi_{23} \text{ окажется больше } 0,6 \text{ (далее проверить!); } \rho_{H_2O} = 1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520/(23+273,15)} \varphi_{23}^{10(\varphi_{23})^2}.$$

Составляем материальный баланс по воде (7):

$$487,767 = 10^{-3} \frac{223,484 \cdot \varphi_{70}^{0,9207} \cdot 35}{1 + (0,8799 - 1)\varphi_{70}} +$$

$$+ 10 \cdot 0,1806(\varphi_{88} \cdot 482,9079)^{0,33+0,003388} \cdot 12 +$$

$$10^{-3} \cdot 0,98529 \varphi_{70} \cdot 231,982 \cdot 1 +$$

$$+ 1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520/(23+273,15)} \varphi_{23}^{10(\varphi_{23})^2} \cdot 300.$$

Поскольку система псевдоравновесна и $H = \text{const}$, то $H = H_{70}^* \varphi_{70} = H_{88}^* \varphi_{88} = H_{23}^* \varphi_{23}$,

откуда $\varphi_{23} = \varphi_{70} H_{70}^* / H_{23}^* = 5,4060 \varphi_{70}$ и

$\varphi_{88} = \varphi_{70} H_{70}^* / H_{88}^* = 0,5970 \varphi_{70}$. Подставляем в уравнение баланса и решаем относительно φ_{70} :

$$487,767 = \frac{7,8219 \varphi_{70}^{0,9207}}{1 + (0,9800 - 1)\varphi_{70}} +$$

$$+ 727,7511 \varphi_{70}^{0,6209} + 0,2286 \varphi_{70} +$$

$$+ 193,4478(5,4060 \varphi_{70})^{10(5,4060 \varphi_{70})^2}.$$

Значение φ_{70} , соответствующее этому уравнению, равно 0,1879524. Отсюда $\varphi_{23} = 1,0161$ и $\varphi_{88} = 0,1122$. Относительная влажность при 23 °С, превышающая единицу, свидетельствует о возможном выпадении воды в виде конденсата. С другой стороны, уравнение для расчёта предельной адсорбции справедливо только до $\varphi = 1$. Исходя из того, что относительная влажность около адсорбента не может превышать 1 (исключаем перенасыщение), составляем новый материальный баланс с учётом наличия конденсата и того, что $\varphi_{23} = 1$ и $\varphi_{70} = 1/5,4060 = 0,18498$, а $\varphi_{88} = 0,184980,5970 = 0,11043$:

$$487,767 = 10^{-3} \frac{223,4841 \varphi_{70}^{0,9207} \cdot 35}{1 + (0,8799 - 1)\varphi_{70}} +$$

$$+ 10 \cdot 0,1806(\varphi_{88} \cdot 482,9079)^{0,33+0,003388} \cdot 12 +$$

$$+ 10^{-3} \cdot 0,98529 \varphi_{70} \cdot 231,982 \cdot 1 +$$

$$+ 1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520/(23+273,15)} \varphi_{23}^{10(\varphi_{23})^2} \cdot 300 + G_k.$$

После подстановки значений относительной влажности рассчитываем количество конденсата: 37,168 кг. При этом вода распределится следующим образом: в масле — 1,654 кг (47,26 мг/кг), в бумаге — 255,451 кг (2,129%), в газовой подушке — 0,0423 кг (42,3 г/м³) и в адсорбере 193,451 кг (0,645 г/г).

Рассчитываем нормативные электротехнические параметры масла:

$$\text{tg} \delta = (2,68 + 6 \cdot 2,1291^{0,85}) e^{-2700/(88+273,15)} = 0,0153$$

(норматив не превышен),

$$\rho_v = 2,7105 \exp[5800/(88+273,15) - 2,8(2,129 - 0,1)^{0,8}] = 1,84 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м (норматив не занижен)}.$$

Допустить конденсацию воды нельзя. Для предотвращения этого можно несколько снизить нагрузку или уменьшить эффективность охлаждения, чтобы расчётным путём приблизиться к насыщению в точке низкой температуры и без образования конденсата достичь наибольшего количества воды в адсорбере. При этом в адсорбере может быть сосредоточено до 190 кг воды из имеющихся в системе 488 кг!

Таким образом, оператор определяет условия, которые надо создать, перед тем как удалить из системы адсорбер для исключительно эффективной и беззатратной осушки системы трансформатора. При этом замена

адсорбента приобретает не командно-инструктивный характер, не имеющий в своей основе никакого научного обоснования, а определяется фактическим состоянием системы трансформатора. Далее мы увидим, что сушка системы путём замены адсорбента продлевает жизнь бумажной изоляции, так что задача определения момента замены адсорбента переходит в чисто экономическую категорию.

Расчёт нижнего предела температуры для остановленного на длительный срок трансформатора (когда в системе наступит равновесие за счёт естественного перемешивания масла и выравнивания его влагосодержания⁷⁾ выполняется аналогично *примеру 3*. Задача может быть решена также приближённо из условия, что вся имеющаяся в системе вода будет поглощена бумагой. В *примере 3* общее количество воды, будучи адсорбированным полностью бумагой, создаст влажность бумаги $100487,767/12000 = 4,065\%$, т.е. имеет смысл проверить не создастся ли неблагоприятная ситуация при предполагаемой температуре длительного хранения⁸. Единственными исходными параметрами являются количество воды в системе и окружающая температура. Заметим, если сразу после останова адсорбер не отключить от системы, то после длительного хранения системы адсорбент окажется намного более сухим: большая часть его воды переместится в бумагу (*пример 4*).

Пример 4. Исходные данные: по текущим данным мониторинга $G = 487,767$ кг, предполагаемая температура хранения 5°C ; $t = t_6 = t_{в.м} = t_{ад} = 5^\circ\text{C}$; $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \varphi \cdot 10^{8,0589-1729,9875/(5+233,856)} = \varphi \cdot 6,5478 \text{ мм Нг}$;

$$H_{50}^* = 20,6481 \text{ мг/кг};$$

$$W = 4,9943(6,5478)^{0,33+0,00335} \%;$$

$$c_r = 0,985296,5478 \text{ г/м}^3;$$

$$a_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520/(5+273,15)}}{4,748 + 0,925/\varphi};$$

$$487,767 = 10^{-3} \varphi 20,6481 \frac{1,022 \cdot 35}{0,047 + \varphi} + 10 \cdot 4,9943 \times$$

$$\times (\varphi 6,5478)^{0,3465} \cdot 12 + 10^{-3} \cdot 6,4513 \varphi + \frac{1,1184 \cdot 300}{4,748 + 0,925/\varphi},$$

отсюда $\varphi = 0,074852$;

⁷ С момента остановки влагосодержание масла в разных частях оборудования начнет изменяться.

⁸ В случае отключения адсорбера от системы, такой опасности не возникнет: $\sim 100(488 - 190)/12000 = 2,48\%$.

$$W = 4,9943(0,074852 \cdot 6,5478)^{0,3465} = 3,901 \%;$$

Пример 4 показывает, что при длительном хранении системы, включающей в себя адсорбер, в масле сосредоточится 0,454, в бумаге — 468,106, в газовой фазе — 0,0005 и в адсорбере — 19,209 кг воды. Влажность бумаги не поднимется выше норматива, так что длительное хранение в этих условиях не противопоказано, хотя решение в целом неверное, так как сосредоточенную в адсорбере воду (до 190 кг) следовало бы удалить.

Расчёт степени полимеризации

Пример 5. Исходные данные: исходное (предыдущее) значение $\text{СП}_{\text{пр}} = 660$, $W = 1,9 \%$ и $M = 10^{-5} \%$ /ч; расчетный интервал времени $\tau = 0,25$ ч (15 мин); данные датчиков: среднее за 15 мин значение $t_{в.м} = 60,00^\circ\text{C}$; по результатам последних анализов масла:

концентрация кислорода в масле $c_{\text{O}_2}^M = 23780$

мкл/л; концентрация антиоксиданта 0,25%; кислотное число 0,08 мг/г.

1. Температура бумаги 75°C .
2. Для К-120 $W_M = -2,7547 + 2114,7/(75 + 273,15) = 3,319\%$
3. Для 75°C и 23780 мкл/л O_2 $\varphi_{\text{O}_2} = 10^{-6} \cdot 23780 / 10^{-0,2542-141,1923/(75+273,15)} = 0,1086$.
4. Для $c_{\text{ант}} = 0,25$ и $\text{КЧ} = 0,08$ $\Psi = 0,5 - 0,11(0,25 - 0,2)/(0,5 - 0,2) + (0,08 - 0,01)/(0,25 - 0,01) = 0,7733$.
5. $k_{\text{осн}} = 1$.
6. $L = e^{-0,00079(75+273,15)} = 0,7595$.
7. $A = 0,7733 e^{0,5(3,319-1,9)0,1086} \times 10^{8+0,381,9} e^{-1470,7595-1000/(8,31441(75+273,15))} = 1,1213 \cdot 10^{-8}$; $B = (0,875 - 0,5 \cdot 0,1086) 10^{-5} = 8,2070 \cdot 10^{-6}$;
 $b = 200 \cdot 9,7 \cdot 0,7595 \cdot 1000 / (8,31441(75+273,15)) = 509,0163$; $\text{СП} = 509,0163 / \ln[(1,1213 \cdot 10^{-8} 509,0163 / (8,2070 \cdot 10^{-6}) (y^{8,2070 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25}) + e^{509,0163/660})] = 659,999435$.

За 15 мин степень полимеризации снизилась на 435 миллионных единицы⁹. Если такие условия будут сохраняться (гипотетически) и далее, то за год степень полимеризации упадет до 640, а за 10 лет — до 479.

Остаточный ресурс твердой изоляции в условиях, приведённых в *примере 5*, составит: в материальном выражении (22)

$$r_{\text{ост}} = 100(659,999435 - 250) / (1000 - 250) = 54,7\%;$$

во временном выражении (23)

$$r_{\text{ост}} = \ln[(e^{b/250} - e^{b/\text{СП}}) / (Ab/B + 1)] / = \ln[(e^{509,0163/250} - e^{509,0163/659,999435}) / (1,1214 \cdot 10^{-8} \times$$

$\times 509,0163/8,207 \cdot 10^{-6} + 1/8,207 \cdot 10^{-6} = 266431$ ч или 30,4 года.

Расчёт восстановления ресурса за счёт сушки

Исключительно эффективная и беззатратная процедура удаления воды из электротехнического объекта посредством замены осушителя позволяет снизить скорость деполимеризации целлюлозы и соответственно увеличить ресурсы объекта по физико-химическим показателям. Рассмотрим этот эффект, опираясь на данные примера 3.

Если бы в системе было 450,599 кг воды, то конденсат отсутствовал бы ($487,767 - 37,168 = 450,599$ кг). При этом в адсорбере сосредоточено 193,451 кг воды, в бумаге – 255,451 кг ($W = 2,129\%$).

Зададим остальные исходные данные: текущее значение $СП_{пр} = 660$; температура бумаги 88°C (заданный режим будет поддерживаться до конца эксплуатации); концентрация кислорода в масле $c_{O_2}^M = 23780$ мкл/л, концентрация антиоксиданта $0,25\%$, кислотное число $0,08$ мг/г (эти параметры примем как постоянные); $M = 10^{-5}\%/ч$.

Рассчитаем ресурс бумаги по степени полимеризации для заданных условий.

1. Температура бумаги 88°C .
2. Для К-120 $W_m = -2,7547 + 2114,7/(88 + 273,15) = 3,101\%$.
3. Для 88°C и 23780 мкл/л O_2 $\varphi_{O_2} = 10^{-6} \cdot 23780 / (10^{-0,2542 - 141,1923/(88 + 273,15)}) = 0,1050$.
4. Для $c_{ант} = 0,25$ и $КЧ = 0,08$ $\Psi = 0,5 - 0,11(0,25 - 0,2)/(0,5 - 0,2) + (0,08 - 0,01)/(0,25 - 0,01) = 0,7733$.
5. $k_{осн} = 1$.
6. $L = e^{-0,00079(88 + 273,15)} = 0,7518$.
7. Для $W = 2,129\%$ и $M = 10^{-5}\%/ч$
 $A = 0,7733e^{0,5(33,101 - 2,129)0,105 \cdot 1 \cdot 10^{8+0,382,129} \times e^{-1470,7518 \cdot 1000/(8,31441(88 + 273,15))}} = 7,5328 \cdot 10^{-8}$;
 $B = (0,875 - 0,5 \cdot 0,105) \cdot 10^{-5} = 8,2250 \cdot 10^{-6}$;
 $b = 200 \cdot 9,70,7518 \cdot 1000 / (8,31441(88 + 273,15)) = 485,7189$;
 $r_{ост} = \ln [(e^{485,7189/250} - e^{485,7189/660}) / (7,5328 \cdot 10^{-8} \cdot 485,7189 / 8,2250 \cdot 10^{-6}) + 1] / 8,2250 \cdot 10^{-6} = 89790$ ч или 10,25 лет.

Итак, в создавшихся условиях трансформатор проработает 10,25 года, и степень полимеризации бумаги достигнет предельного значения 250.

При замене адсорбера из системы будет удалено 193,448 кг и добавлено с новым адсорбентом 1,5 кг воды (в расчёте на 0,5% исходной влажности силикагеля). Таким образом, общее количество воды в системе $450,599 - 193,451 + 1,5 = 258,648$ кг.

Сразу после замены адсорбера вода начнет перераспределяться. Повторим начальные стадии расчета в примере 3 до составления нового материального баланса по воде.

Для 70°C :

$$P_{H_2O} = \varphi_{70} \cdot 10^{8,0589 - 1729,9875/(70 + 233,856)} =$$

$$= \varphi_{70} \cdot 231,9822 \text{ мм Нг}; H_{70}^* = 253,9881 \text{ мг/кг};$$

для $t > 40^\circ\text{C}$ $\alpha/\beta = 0,9207$; $\beta = 15,7984$;
 $\alpha\beta = 229,7974$; $C = 0,8799$;

$$H = 253,9881 \frac{0,8799 \varphi_{70}^{0,9207}}{1 + (0,8799 - 1) \varphi_{70}^{229,7974 \varphi_{70}}} \text{ мг/кг};$$

$c_r = 0,98529 \varphi_{70} \cdot 231,9822 \text{ г/м}^3$;
 для 88°C :

$$P_{H_2O} = \varphi_{88} \cdot 10^{8,0589 - 1729,9875/(88 + 233,856)} =$$

$$= \varphi_{88} \cdot 482,9079 \text{ мм Нг}; H_{88}^* = 425,4083 \text{ мг/кг};$$

$$W = 6,1 \cdot e^{-0,0488(\varphi_{88} \cdot 482,9079)} \cdot 0,33 + 0,003388 \%$$
;
 для 23°C : $H_{23}^* = 46,9826 \text{ мг/кг}$; из предположения, что φ_{23} окажется больше 0,6 (далее проверить!)

$$a_{H_2O} = 1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520/(23 + 273,15)} \varphi_{23}^{10(\varphi_{23})^2}$$

Составляем материальный баланс по воде

$$258,648 = 10^{-3} \frac{223,4841 \varphi_{70}^{0,9207} \cdot 35}{1 + (0,8799 - 1) \varphi_{70}^{229,7974 \varphi_{70}}} +$$

$$+ 10 \cdot 0,1806(\varphi_{88} \cdot 482,9079)^{0,33 + 0,003388} \cdot 12 +$$

$$+ 10^{-3} \cdot 0,98529 \varphi_{70} \cdot 231,9822 \cdot 1 +$$

$$1,3 \cdot 10^{-4} e^{2520/(23 + 273,15)} \varphi_{23}^{10(\varphi_{23})^2} \cdot 300.$$

При подстановке $\varphi_{23} = \varphi_{70} H_{70}^* / H_{23}^* =$
 $= 5,4060 \varphi_{70}$ и $\varphi_{88} = \varphi_{70} H_{70}^* / H_{88}^* = 0,5970 \varphi_{70}$
 получаем $\varphi_{70} = 0,1418755$ и следующее распределение воды: в масле 1,296 кг (37,02 мг/кг), в бумаге 216,686 кг ($W = 1,806\%$), в газовой фазе 0,0324 кг (32,4 г/м³) и в адсорбере 40,627 кг (0,135 г/г). Далее рассчитываем значение A , зависящее от влажности бумаги W , и ресурс

$$A = 0,7733e^{0,5(33,101 - 1,806)0,105 \cdot 1 \times 10^{8+0,381,806} e^{-1470,7518 \cdot 1000/(8,31441(88 + 273,15))}} =$$

$$= 5,7754 \cdot 10^{-8}; B = 8,2250 \cdot 10^{-6}; b = 485,7189;$$

⁹ Это соответствует разрыву примерно двух гликозидных связей за 1 час на каждые 1000 молекул целлюлозы с $СП = 660$.

$$r_{\text{ост}} = \ln[(e^{485,7189/250} - e^{485,7189/660}) / (5,7754 \cdot 10^{-8} \cdot 485,7189/8,2250 \cdot 10^{-6}) + 1] / 8,2250 \cdot 10^{-6} = 108158 \text{ ч или } 12,35 \text{ года.}$$

Итак, удаление из системы 192 кг воды путём замены адсорбера (или адсорбента) позволяет более чем на 2 года увеличить ресурс бумаги в заданных условиях за счёт снижения скорости деполимеризации.

Особенности работы системы мониторинга

Для запуска системы физико-химического мониторинга кроме данных о самом объекте (количество масла, бумаги, адсорбента) необходимо располагать исходными данными и данными предпускового обследования: СП, $k_{\text{осн}}$ и c_{O_2} , $c^{\text{ант}}$, КЧ. При наличии этих данных система физико-химического мониторинга может быть запущена в любой момент вне зависимости от предыдущей истории объекта.

При временной остановке циркуляции масла будет нарушено главное условие - постоянство по всему контуру влагосодержания масла H . В этом случае система физико-химического мониторинга должна быть остановлена с фиксацией всех параметров, с которых система продолжит свою работу при включении. Если во время остановки объекта были выполнены технологические мероприятия по замене масла, его дегазации или осушке, добавлению антиоксиданта и прочее, то в банк исходных данных должны быть внесены изменения без пересчёта предыдущих результатов (как это предполагается при внесении новых данных анализа масла, полученных в ходе оперативной диагностики). Удаление части воды путём замены адсорбера или адсорбента не потребует вмешательства в исходные данные: система сама отразит все произошедшие изменения. Заметим, что система мониторинга будет держать на контроле и назначать все эти мероприятия в соответствии с диагностическим заключением.

Выводы

1. Представлен алгоритм программы физико-химического мониторинга на основе совмещённого датчика температуры-влажности в верхних слоях масла и датчика температуры охлаждённого масла. Программа физико-химического мониторинга, которая будет написана на основе данного алгоритма, вооружает оператора знаниями о текущей жизни объекта, предопределяет мероприятия

по продлению жизни объекта и предостерегает от неправильных действий по управлению объектом. Страничка программы постоянно отражает важнейшие текущие физико-химические характеристики изоляции — влагосодержание, фактор потерь и удельное объёмное сопротивление бумаги, и главный показатель состояния целлюлозы — твёрдой основы бумажно-масляной изоляции — непосредственно текущим значением степени полимеризации. Ресурсные показатели представлены в виде конкретных значений остаточного ресурса по количеству воды в объекте и по степени полимеризации бумаги.

2. Программа позволяет заранее рассчитать ситуацию при предполагаемом изменении режима работы объекта и понять последствия этих действий до того, как принять такое управленческое решение.

3. Программа позволяет найти экономически выгодные моменты для технически эффективной и беззатратной процедуры осушки объекта с целью увеличения его ресурса.

4. Представлены примеры расчёта параметров влажности изоляционных материалов, степени полимеризации бумаги и ресурсов по физико-химическим показателям применительно к трансформатору с принудительной циркуляцией масла. Другие виды электрооборудования, например, с естественной циркуляцией масла, потребуют иного расположения датчиков и внесения некоторых поправок при составлении уравнений материального баланса.

5. Программа физико-химического мониторинга станет неотъемлемой частью развивающейся системы автоматического управления электроэнергетическим объектом с целью оптимизации распределения электроэнергии.

Список литературы

1. Аракелян В.Г. Цели, понятия и общие принципы диагностического контроля высоковольтного электротехнического оборудования // Электротехника. 2002. № 5. С. 23–27.
2. Аракелян В.Г., Дарьян Л.А. Идеологическая и приборно-аналитическая база физико-химического диагностического контроля высоковольтного маслонеполненного электрооборудования // Электротехника. 1997. № 12. С. 2–12.
3. Аракелян В.Г. Диагностика состояния изоляции маслонеполненного оборудования по влагосодержанию масла // Электротехника. 2004. № 3. С. 2–13.
4. V.G.Arakelian, I.Fofana. Water in oil-filled high-voltage equipment. Part I. States, solubility end equilibrium in insulating materials // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2007. Vol. 23. No. 4. P. 31–43.
5. V.G.Arakelian, I.Fofana. Water in oil-filled high-voltage equipment. Part II. Water content as physico-chemical diagnosis tool of insulation condition // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2007. Vol. 23. No. 5. P. 15–243.

6. Аракелян В.Г. Химия, механизмы и кинетика старения целлюлозных материалов. Часть I. Химия, механизмы и кинетика разложения целлюлозы // Электротехника. 2006. № 6. С. 29–38.

7. Аракелян В.Г. Химия, механизмы и кинетика старения целлюлозных материалов. Часть II. Кинетика образования продуктов разложения целлюлозы // Электротехника. 2006. № 7. С. 51–64.

8. Куц П.С., Пикус И.Ф. Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции. Минск: Наука и техника, 1979.

Аракелян Вадим Гарегинович – ведущий научный сотрудник ФГУП «ВЭИ». Окончил Московский институт тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова в 1961 г. Защитил кандидатскую диссертацию по газохроматографическим проблемам физической химии в 1969 г., докторскую диссертацию по физико-химическим проблемам высоковольтной электротехники – в 1995 г.

Повышения эффективности регулятора скорости частотно-регулируемого асинхронного электропривода средствами искусственного интеллекта

БРАДАИ Р., ШЕТАТ Б., ЛАДЫГИН А.Н.

Рассматривается методика использования средств искусственного интеллекта при синтезе эффективной структуры регулятора скорости в системе частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением. Показана возможность использования как регулятора с адаптивной фазы-нейронной структурой, так и регулятора со структурой трёхслойной искусственной нейронной сети. Приведены результаты исследования характеристик рассматриваемых регуляторов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, частотно-регулируемый электропривод, векторное управление, фазы-регулятор, искусственная нейронная сеть

В последние годы частотно-регулируемый асинхронный электропривод (ЭП) с векторным управлением и косвенным определением положения поля (Indirect Field Oriented Control – IFOC) находит множество применений [1,2]. Обобщённая блок-схема такой системы с контуром регулирования скорости показана на рис. 1. Рабочие алгоритмы в такой системе основываются на анализе векторных составляющих тока статора в осях d - q , вращающихся синхронно с вектором потока сцепления ротора. В этих координатах независимо рассматриваются две компоненты тока статора: I_{dsr} , которая определяет магнитный поток, и I_{qsr} , которая определяет момент.

This article describes the application of artificial intelligence to synthesis an efficient speed controller for indirect field oriented induction machine drive. In this case, two methods of artificial intelligence are proposed to reproduce the characteristics of fuzzy controller having the maximum number of fuzzy sets. The first is the Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System structure of Sugeno, and the second is the artificial neural networks structure. The result characteristics of each controller are presented.

Key words: fuzzy control, induction machine, field oriented control, ANFIS, ANN

Как правило, такие электроприводы должны обладать хорошей управляемостью и низкой чувствительностью к возможным вариациям (неопределённостям) параметров системы. Обычной причиной неопределённостей являются изменения параметров под действием внешних факторов и проявления нелинейности динамики самого двигателя привода.

Для требуемого управления скоростью в системах асинхронного привода с косвенным определением вектора потока и ориентацией по полю традиционно используется ПИД-регулятор скорости. Однако при такой структуре характеристики системы оказываются очень чувствительны к неопределённостям значений параметров, когда неточности оп-

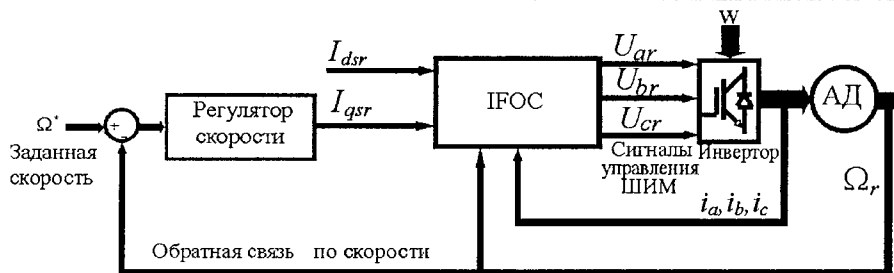


Рис. 1. Блок-схема рассматриваемого электропривода

ределения параметров существенно отражаются на характеристиках ЭП.

С другой стороны, в подобных ЭП может быть эффективным применение регуляторов на базе фаззи-логики, благодаря их способности обеспечивать требуемые характеристики в условиях неопределённости параметров [3,4]. Наилучшие результаты от применения фаззи-логики при управлении скоростью асинхронного привода с косвенной ориентацией по полю могут быть получены при использовании регулятора с семью функциями принадлежности. Эффективность такого регулятора в сравнении с традиционным ПИД-регулятором хорошо представлена в [2]. Показано, что этот регулятор имеет низкую чувствительность к неопределённости параметров и обеспечивает лучшие характеристики по сравнению с ПИД-регулятором в условиях регулирования скорости при возмущениях и вариации параметров.

Однако, регулятор с такой структурой характеризуется значительными затратами времени на вычисления. Следует отметить, что даже при использовании специализированного DSP-микроконтроллера полный цикл выполнения расчётных алгоритмов IFOC с фаззи-регулятором скорости, занимает более 100 мкс. Это приводит к ограничению верхнего предела выходной частоты инвертора на уровне 3–5 кГц, что не достаточно для удовлетворения требований современной практики частотно-регулируемого ЭП, когда требуются частоты до 10 кГц и выше. Таким образом, являются актуальными поиски решений, позволяющих повысить быстродействие фаззи-регулятора без снижения эффективности его характеристик. Заметим, что упрощение структуры фаззи-регулятора путём простого снижения числа функций принадлежности с семи до пяти не даёт удовлетворительного результата, так как получаемые в этом случае характеристики ЭП не являются удовлетворительными.

Цель настоящей статьи – раскрыть возможность синтеза новых структур для регуляторов скорости частотно-регулируемого асинхронного электропривода, обеспечивающих эффективность характеристик не хуже, чем фаззи-регулятор с семью функциями принадлежности, при меньшем времени действия. При синтезе предлагается применить два метода, использующих средства искусственного интеллекта.

Первый метод – использование адаптивной фаззи-нейронной системы (ANFIS – Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System) [5]. В этой системе может быть минимизировано число функций принадлежности для каждой входной переменной и исключён этап дефаззификации (структура Сугено), что позволит повысить быстродействие регулятора скорости.

Второй метод – применение структуры с искусственной нейронной сетью (Artificial Neural Network – ANN). Характерной особенностью такой структуры является способность воспроизводить сложные характеристики нелинейных систем (в том числе фаззи-регуляторов), а также производить параллельные вычисления с высокой производительностью [3], что положительно отразится на быстродействии регулятора скорости.

Предлагаемые алгоритмы синтеза и структуры новых регуляторов исследованы при помощи средств программного обеспечения Matlab.

Особенности применения средств искусственного интеллекта

Применение фаззи-регулятора в качестве регулятора скорости иллюстрируется блок-схемой, представленной на рис. 2. На входы фаззи-регулятора подаются масштабированные значения ошибки по скорости (e) и изменения ошибки по скорости (Δe) за один шаг работы регулятора. Выходом фаззи-регулятора является изменение задания тока

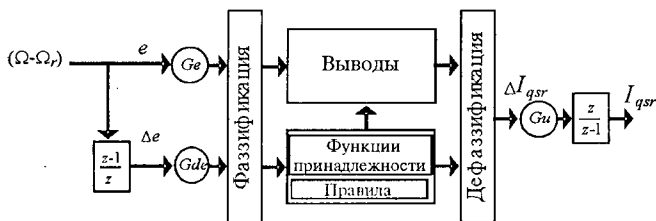


Рис. 2. Блок-схема фаззи-регулятора

(ΔI_{qsr}) за один шаг работы регулятора. Коэффициенты усиления G_e , G_{de} и G_u могут быть изменены при настройке фаззи-регулятора на желаемую характеристику.

Фаззификация каждой входной переменной характеризуется числом функций принадлежности (n) соответствующего фаззи-контроллера FC_n . Функции принадлежности этих регуляторов имеют треугольную форму, являются равномерно распределёнными, симметричными и эквидистантными.

Регулятор FC_n при регулировании скорости асинхронной машины использует матрицу правил размерностью $n \times n$.

На этапе дефаззификации производится обратное преобразование к чётким величинам.

Получить наглядное представление о свойствах различных регуляторов с отличающимися наборами правил позволяет использование характеристической поверхности, отображающей характеристику вход-выход соответствующего регулятора. Например, на рис. 3 представлена поверхность отображения характеристики вход-выход регулятора при $n = 7$ (FC7), предложенная в [2]. Подробное описание возможных структур фаззи-регуляторов для электропривода можно найти в [1,2].

Применение структуры ANFIS в качестве регулятора скорости основано на способности этой структуры воспроизводить существенно нелинейные характеристики фаззи-регулятора. Архитектура такой сети характеризуется тем, что каждая стадия синтеза фаз-

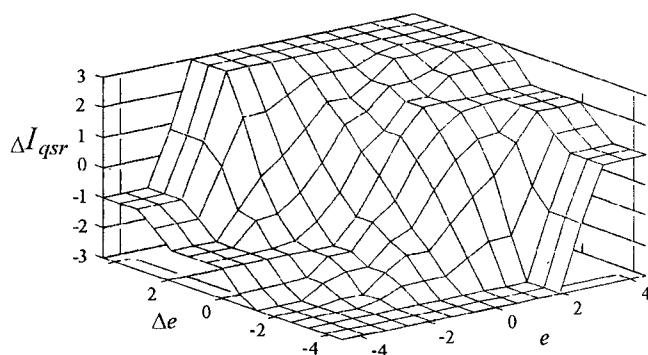


Рис. 3. Характеристическая поверхность регулятора FC_7 ($\Delta I_{qsr} = f(e, \Delta e)$)

зи-выводов осуществляется соответствующим слоем адаптивной сети (рис. 4). Синтез выводов в ANFIS может быть произведен как методом Мамдани, так и Сугено [5]. В данной работе для воспроизведения характеристик регулятора со структурой FC7 используется метод Сугено, поскольку этот метод более простой и позволяет сократить время расчёта.

На рис. 4 представлена обобщённая структура ANFIS, соответствующая рассматриваемому применению. Структура имеет:

- два входа и только один выход (2 входных узла соответствуют ошибке по скорости и её производной, а выход соответствует изменению задания тока ΔI_{qsr});
- каждому входу соответствует две функции принадлежности (F_1, F_2, F_3, F_4);
- два правила нечёткой логики (Правило 1: если e есть F_1 и Δe есть F_3 , то результат – y_1 ; Правило 2: если e есть F_2 и Δe есть F_4 то результат – y_2).

Рассматриваемая ANFIS характеризуется пятью слоями, каждый из которых соответствует определённому этапу работы фаззи-регулятора. Состояние узлов каждого слоя определяется следующим образом.

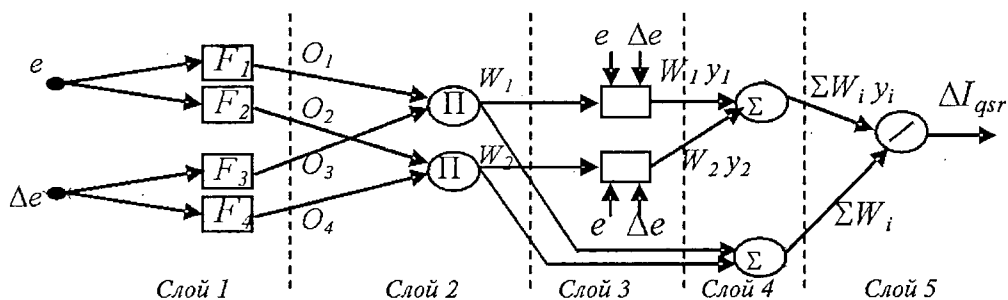


Рис. 4. Структура Sugeno ANFIS

Слой 1: выход каждого узла (нейрона), число которых соответствует числу функций принадлежности фаззи-регулятора, определяется как:

$$O_i = F_i(X, \alpha_{ij}), \quad (1)$$

где X – вход узла (в данном случае e и Δe); ij – параметры j узла i ; O_i – выход узла i ; F_i – функция принадлежности для узла i .

Например, для функции

$$F_i(X_i, \alpha_{iq}, \alpha_{i2}) = \max(\min(1, (\alpha_{i1} - X_i) / \alpha_{i2}), 0) \quad (2)$$

параметрами узла i являются α_{i1} и α_{i2} .

Слой 2: выход каждого узла, не имеющего параметров,

$$W_1 = O_1 \wedge O_3; \quad (3)$$

$$W_2 = O_2 \wedge O_4. \quad (4)$$

Слой 3: каждый узел имеет свои параметры и выполняет функцию, заданную следующим уравнением:

$$y_i W_i = (p_i e + q_i \Delta e + r_i) W_i, \quad (5)$$

где p_i, q_i, r_i – параметры узла.

Слой 4: узлы параметров не имеют и выполняют сложение выходов узлов двух предшествующих слоев.

Слой 5: узел обеспечивает вычисление выходного сигнала ANFIS по формуле:

$$\Delta I_{qsr} = \frac{\sum W_i y_i}{\sum W_i}. \quad (6)$$

Число функций принадлежности каждой переменной может быть выбрано от единицы до максимального. В нашем случае это максимальное число равно 7. Целью исследования структуры с ANFIS Сугено является поиск аппроксимации характеристической поверхности FC_7 при минимально возможном числе функций принадлежности.

Специфика применения структуры ANN в качестве регулятора скорости иллюстрируется структурой, показанной на рис. 5. Такая трёхслойная ANN с последовательными связями является универсальным аппроксиматором. В рассматриваемом случае ANN имеет 2 входных узла и один выходной. Входными сигналами являются ошибка по скорости и изменение ошибки по скорости за один шаг работы регулятора. Два входных узла не имеют параметров. Выходной узел выдаёт управляющий сигнал, соответствующий изменению задания тока ΔI_{qsr} .

В общем случае выходной сигнал

$$y_n = f_n \left(\sum_{i=1}^m w_m^j x_i \right), \quad (7)$$

где w_m^j – весовой коэффициент связи между узлом i слоя j и узлом n слоя $j+1$; x_i – выход узла i ; m – число узлов в слое j ; f_n – нейронная активационная функция (чаще всего в узлах выходных слоёв используется линейная функция активации, а в скрытых слоях – сигмоидальная).

При синтезе регулятора на базе ANN, важно выбрать оптимальное число нейронов в скрытом слое, оно должно обеспечивать компромисс между простотой и эффективно-

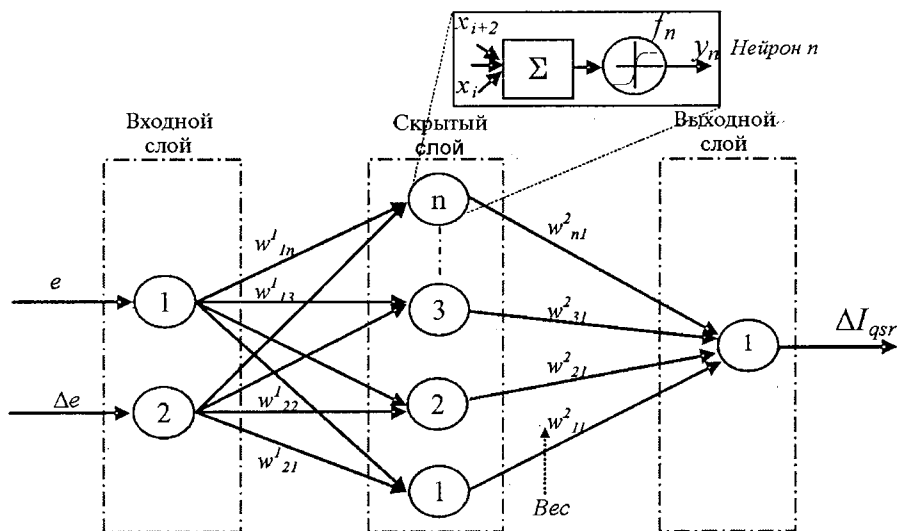


Рис. 5. Структура ANN

стью структуры ANN. Весовые коэффициенты ANN определяются после настройки.

Синтез регуляторов со структурами ANFIS или ANN

Рассмотрим метод синтеза новых регуляторов, которые способны воспроизводить характеристики регулятора FC₇ с допустимой ошибкой при более простой структуре. В этом методе используется способность структур ANFIS и ANN аппроксимировать нелинейные характеристики регулятора FC₇ (рис. 6). Новые регуляторы со структурами ANFIS или ANN должны иметь минимально возможное число функций принадлежности для ANFIS или нейронов – для ANN. В рамках этого метода решаются следующие основные задачи:

1. *Выбор конкретного вида структуры ANFIS или ANN.* На этом этапе производится выбор конкретного числа функций принадлежности и их формы (треугольная или трапецеидальная) для структуры Сугено ANFIS, или конкретного числа нейронов и их функций активации для структуры ANN с последовательными связями. Затем начинается процесс обучения выбранной структуры в режиме *off-line* с целью определения параметров нового регулятора. Изначально выбранная структура должна быть минимальной (например, три функции принадлежно-

сти для структуры ANFIS или семь нейронов для ANN). Если эта структура аппроксимирует регулятор FC₇ с необходимой точностью, процесс обучения заканчивается. В противном случае следует выбор более сложной структуры регулятора и повтор этапа обучения.

2. *Формирование «тренировочного множества».* Это множество представляет собой совокупность *n* значений (вектор) входных переменных (*e*, Δe) и соответствующих им значений выхода (вектор ΔI_{qsr}) регулятора FC₇. Это «тренировочное множество» должно охватывать всю область определения функций принадлежности рассматриваемого регулятора FC₇ ($e, \Delta e \in [-4, 4]$). Иными словами, весь интервал изменения входных переменных регулятора FC₇ должен быть разбит (дискретизирован) на отрезки (дискреты) заданного значения и переменные на этих отрезках должны составить «тренировочное множество» [4]. Таким образом, получается множество *T*, состоящее из *n* пар значений следующего вида:

$$T = \begin{cases} (e_1, \Delta e_1), \Delta I_{qsr1}; \\ (e_2, \Delta e_2), \Delta I_{qsr2}; \\ \vdots \\ (e_n, \Delta e_n), \Delta I_{qsrn}. \end{cases} \quad (8)$$

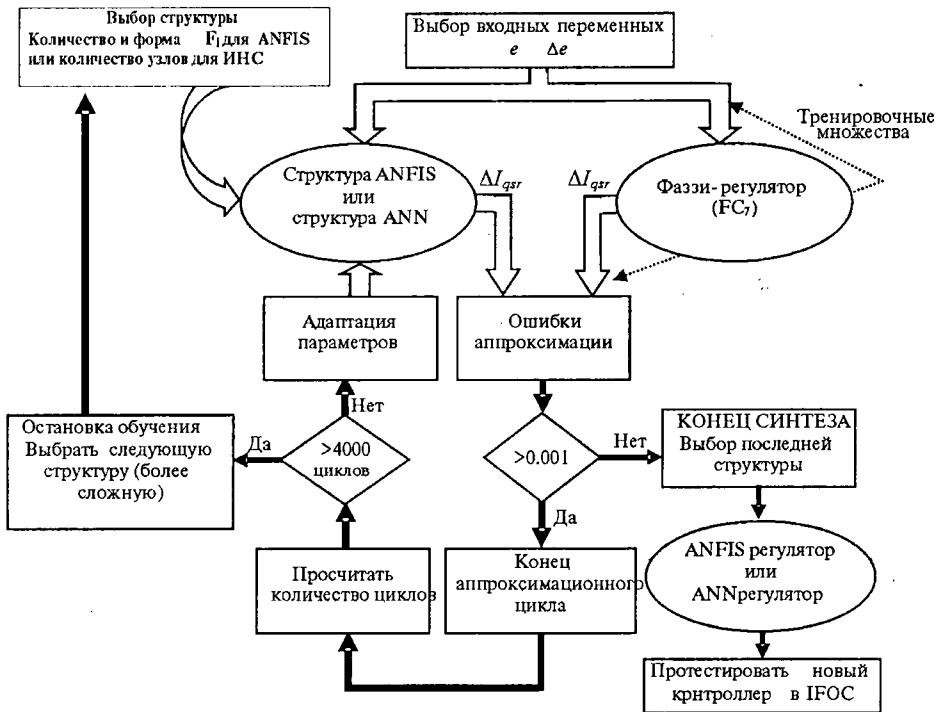


Рис. 6. Синтезы новых регуляторов посредством ANFIS или ANN структур

3. Выбор заданной ошибки аппроксимации и максимально допустимого числа тренировочных циклов. Заданная ошибка выбирается из требования обеспечить в частотно-регулируемом асинхронном ЭП с косвенным определением положения поля при новом регуляторе статические и динамические характеристики, аналогичные характеристикам при регуляторе FC_7 . В нашем случае выбираем $\varepsilon = 0,001$.

Максимально допустимое число тренировочных циклов N означает такое их число, после которого фиксируемая ошибка аппроксимации перестает уменьшаться и необходимо менять структуру регулятора на более сложную. В нашем случае выбирается $N = 4000$.

4. Выбор метода *off-line* обучения. Для определения параметров каждого узла в структуре ANFIS используется комбинация двух обучающих методов — метода градиентного и метода наименьших квадратов [3]. Градиентный метод используется в первом слое ANFIS при определении параметров функций принадлежности, а второй метод — при определении параметров третьего слоя (см. рис. 4). При обучении в структуре ANN для определения весов используется алгоритм «обратного распространения ошибки» [1, 5].

Представленный метод синтеза регуляторов со структурами ANFIS или ANN был реализован на компьютере в программе MatLab. Первые же модельные эксперименты с алгоритмами обучения в структурах ANFIS и ANN показали, что выбор числа значений тренировочного множества (8) при синтезе нового регулятора является деликатной проблемой, поскольку отчётливо проявилась следующая дилемма: когда число значений тренировочного множества велико, достигается высокая точность аппроксимации, но результатом синтеза является сложная структура нового регулятора. С другой стороны, при малом числе значений этого множества синтез даёт простую структуру, но с низкой точностью аппроксимации. Например, при задании названной выше ошибки аппроксимации, алгоритм синтеза (см. рис. 6) закончился выбором структуры ANFIS с 6 функциями принадлежности, а для структуры ANN было выбрано тридцать нейронов. Полученные в результате синтеза регуляторы имели структуру, сравнимую по

сложности со структурой FC_7 , и их использование не позволяет получить требуемый эффект повышения быстродействия регулятора.

Для разрешения этой дилеммы авторами предложено применить «тренировочное множество», получаемое при дискретизации интервала входных переменных на отрезки переменного значения. При этом в той части интервала, где требуется высокая точность аппроксимации, отрезки дискретизации должны быть меньше, чем в той части интервала, где точность не столь важна.

В рассматриваемом случае предложено разделить характеристическую поверхность FC_7 на 2 различные зоны (рис. 7). Центральная зона, находящаяся в центре характеристической поверхности, является самой ответственной зоной. Плохая аппроксимация в этой зоне может серьезно отразиться на качестве новых регуляторов, привести к неравномерности скорости и снижению точности реакции на внешние возмущения. Чтобы этого избежать, необходимо аппроксимировать поверхность этой зоны максимально точно. Другая зона — на периферии центральной содержит ровные участки на границах характеристической поверхности. Эта зона определяет динамику регулятора при больших отклонениях. В этой зоне погрешность аппроксимации сказывается на точности регулятора в меньшей степени, чем в центральной.

В нашем случае центральная зона располагается на интервале $e, \Delta e \in [-0,6; 0,6]$, и в этой зоне используются малые дискреты 0,05 (всего 25 значений). Вторая зона расположена на интервале $e, \Delta e \in [-4, 0,6 \cup 0,6, 4]$, где задано большое значение дискрет: 0,2 (34

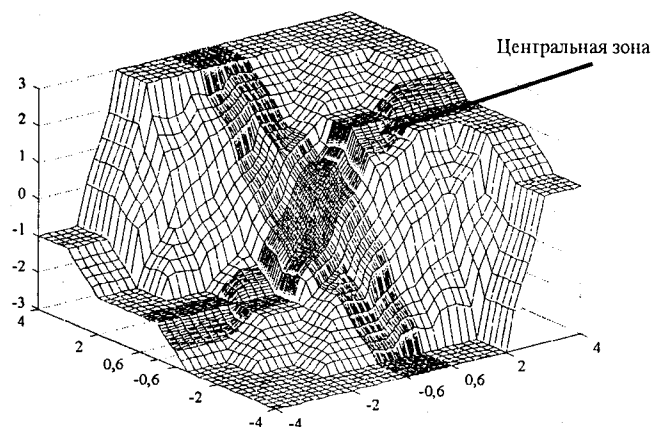


Рис. 7. Распределение тренировочного множества на две зоны

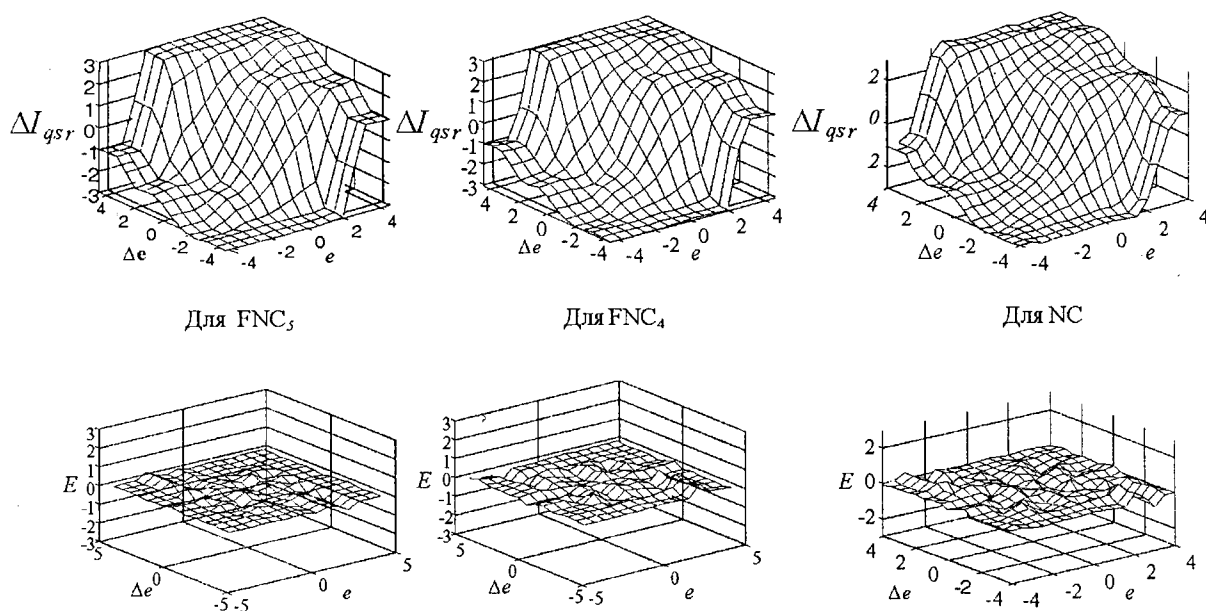


Рис. 8. Характеристические поверхности регуляторов FNC_5 , FNC_4 , NC и их отклонения от поверхности FC_7

значений). Таким образом, имеется 59 значений для каждой переменной, и полное количество входных/выходных тренировочных пар составляет 3481 (59×59). В результате получено новое тренировочное множество T , графическое представление которого приведено на рис. 7. Именно такое тренировочное множество использовалось затем при синтезе новых регуляторов.

В процедуре синтеза новых регуляторов первоначально была выбрана структура ANFIS с треугольными функциями принадлежности для каждой входной переменной. В результате синтеза был получен регулятор с числом функций 5. Затем исследовалась структура с трапецидальными функциями принадлежности. При этой структуре новый регулятор имеет 4 функции. Эти новые регуляторы соответственно обозначены — FNC_5 и FNC_4 . Для завершения процедуры синтеза функций принадлежности каждого из этих новых регуляторов, обеспечивающих необходимое качество аппроксимации, потребовалось 50 обучающих циклов.

При синтезе регулятора со структурой ANN, были использованы сигмовидные функции активации. В результате синтеза был получен регулятор, содержащий 19 узлов в скрытом слое. Этот новый регулятор обозначен NC . Для получения необходимого качества аппроксимации при синтезе регулятора с такой структурой потребовалось 800 циклов обучения.

Отметим, что эти характеристические поверхности регуляторов FNC_5 , FNC_4 , NC (рис. 8) очень схожи с характеристической поверхностью FC_7 , на них воспроизводятся как плоские, так и нелинейные участки, причём поверхность регулятора FNC_5 наиболее схожа с поверхностью FC_7 .

Сравнение регуляторов при моделировании системы векторного управления

Для оценки эффективности разработанных регуляторов использовалась компьютерная модель асинхронного электропривода с векторным управлением, по структуре IFOC согласно рис. 1. Модель была построена в среде MatLab-Simulink.

На рис. 9 представлена функциональная блок-схема модели, на которой проводились исследования. В модели использован стандартный блок представления АД «Asynchronous Machine» в осях α, β , неподвижных относительно статора. Для моделирования инвертора использован стандартный блок «IGBT-Diode bridge». Для управления ключами инвертора разработан программный блок генератора, реализующий принцип векторной ШИМ.

При моделировании управляющей части системы ЭП реализовано два контура регулирования соответствующих составляющих тока статора в осях d, q .

Для обеспечения независимого регулирования составляющих тока по осям d, q используется «блок компенсации», реализующий вычисление по формуле

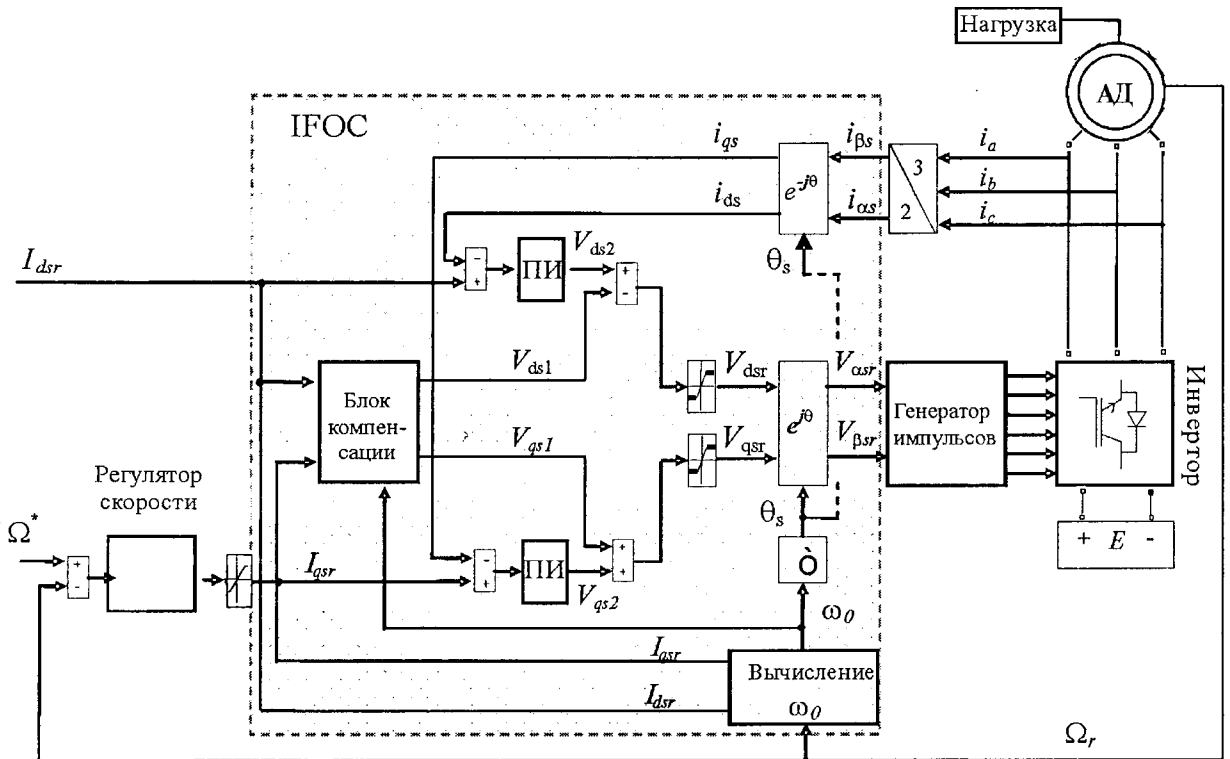


Рис. 9. Функциональная блок-схема модели

$$V_{ds1} = \sigma L_s \omega_s I_{qs}; \quad V_{ds1} = \left(\sigma L_s \omega_s + \frac{L_m^2}{L_r} \omega_s \right) I_{ds} \quad (9)$$

В каналах задающих сигналов V и V включены нелинейные блоки, ограничивающие эти сигналы в пределах $\pm E/2$. Для представления составляющих статорного тока в осях d, q используется преобразование Парка, необходимое для преобразования значения угла θ_s получается интегрированием скорости поля машины.

В контуре скорости при моделировании использовались все типы регуляторов, методика синтеза которых представлена выше. При синтезе фаззи-регулятора использованы стандартные возможности блока «Fuzzy Logic Controller» из библиотеки «Matlab-Toolbox». При синтезе регулятора ANFIS применялась фаза обучения из «Anfis Editor Fuzzy Tool-

box». При синтезе Neural Network Controller использовалась фаза обучения из «Neural Network Toolbox».

Для сравнительной оценки различных регуляторов производился анализ процессов реакции скорости ЭП на ступенчатые воздействия по управлению или нагрузке. В качестве примера на рис. 10 представлены графики изменения скорости ротора в пределах ± 150 рад/с, отражающие реакцию системы на скачки сигнала задания (пунктирная линия, пуск – при $t=0$, реверс назад – при $t=1,4$ с, реверс вперед – при $t=2,5$ с, стоп – при $t=3,5$ с), и скачок нагрузки (верхний график, нагрузка изменяется на $\Delta T_L=10$ Н·м при $t=1$ с и $t=2$ с) для пяти типов исследуемых регуляторов.

Таблица

Характеристики регуляторов с различной структурой

Регулятор	F_i	Количество правил	Дефазификация	Реакция на скачок задания, с	Реакция на скачок нагрузки	
					рад/с	с
FC ₇	21	49	Есть	0,22	0,9	0,10
FC ₅	15	25	Есть	0,35	1,1	0,30
FNC ₅	10	25	Нет	0,20	1,8	0,11
FNC ₄	8	16	Нет	0,30	0,9	0,11
NC	19 нейронов в скрытом слое			0,30	1,0	0,18

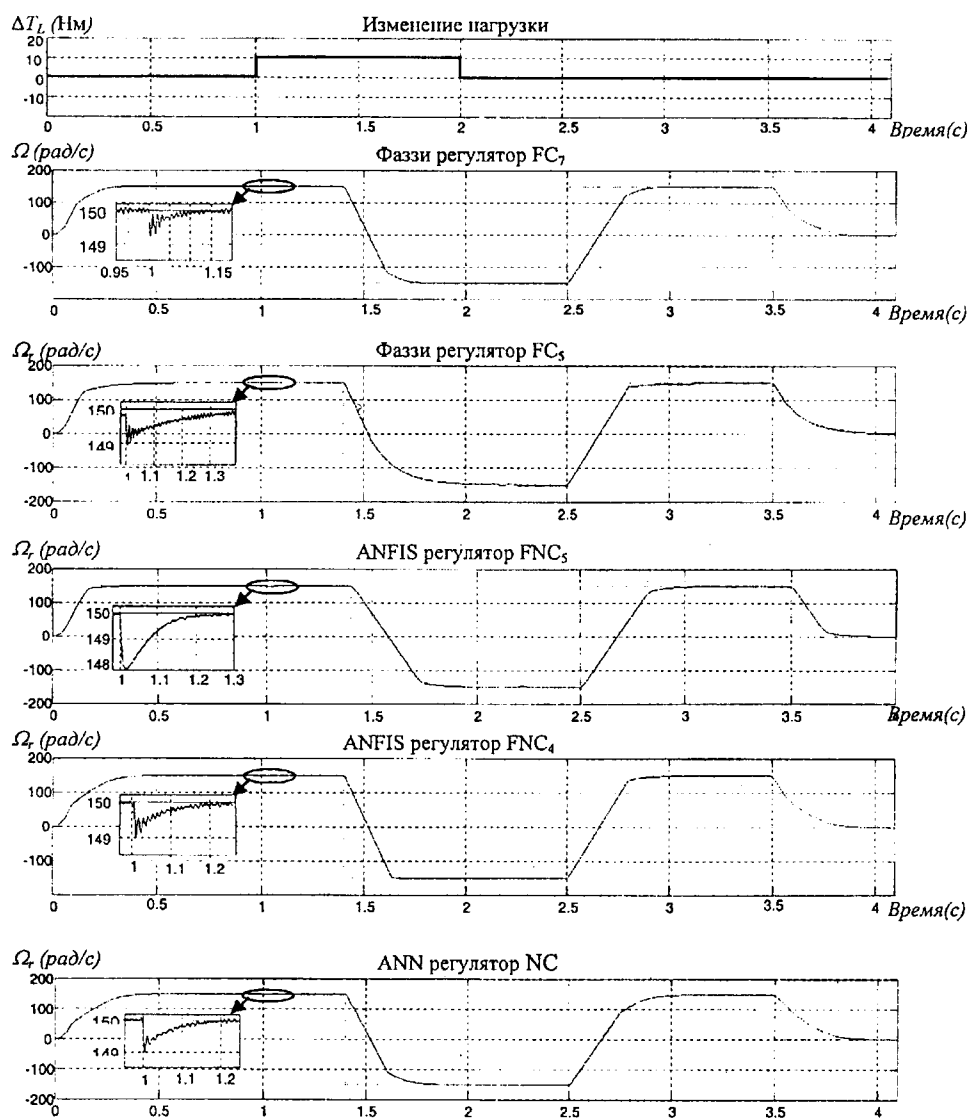


Рис. 10. процессов реакции скорости на ступенчатые воздействия по управлению и нагрузке

Были заданы следующие параметры двигателя: 3 фазы, 50 Гц, 220/380 В, 1,5 кВт, 1420 об/мин, $R_s=4,85$ Ом, $R_r=3,805$ Ом, $p=2$, $L_s=L_r=0,274$ Гн, $L_m=0,258$ Гн, $J_m=0,031$ кг·м². Инвертор напряжения имеет ШИМ с частотой коммутации $f=750$ Гц.

Из рис. 10 видно, что характеристики регулятора FC_7 лучше, чем FC_5 , так как время реакции на скачок задания для FC_7 равно 0,22 с, а для FC_5 – около 0,35 с. Когда прикладывается нагрузка, FC_7 восстанавливает заданное значение скорости через 0,1 с при максимальном отклонении 0,9 рад/с, а FC_5 тратит около 0,3 с при отклонении 1,1 рад/с.

Анализ быстродействия других регуляторов показывает, что их время реакции около 0,2 с, 0,3 с и 0,3 с соответственно для FNC_5 ,

FNC_4 , и NC_5 . При возмущении по нагрузке реакция регуляторов составляет, соответственно: около 0,2 с при 1,8 рад/с для FNC_5 ; 0,11 с при 0,9 рад/с для FNC_4 ; и 0,18 с при 1 рад/с для NC .

Характеристики всех регуляторов представлены в таблице.

Полученные результаты показывают, что FNC_5 , FNC_4 и NC воспроизводят характеристику FC_7 с незначительными потерями. При этом наиболее простой для реализации является структура FNC_4 .

Выводы

1. Актуальна разработка эффективной структуры для интеллектуального регулятора скорости в системе IFOC. Такой регулятор

способен обеспечивать заданные динамические свойства системы *при низкой чувствительности к неопределённости её параметров*. При синтезе важно обеспечить, чтобы этот регулятор имел достаточно простую структуру, так как сложность структуры предопределяет затраты времени на каждый цикл вычислений сигнала управления и непосредственно сказывается на динамических свойствах системы регулирования в целом.

2. В результате проведенных исследований установлена реальная возможность упростить известную и опробованную структуру FC для регулятора скорости в системе IFOC без серьезного ухудшения характеристик регулятора. Показано, что при синтезе могут быть использованы два подхода:

– использование регулятора со структурой Сугено ANFIS с 4 трапецидальными функциями принадлежности для каждой входной переменной;

– использование регулятора со структурой ANN с последовательными связями, имеющей 19 нейронов в среднем слое.

3. Для того, чтобы в результате синтеза получить эффективную структуру регулятора, необходимо разбивать весь интервал аппроксимации на зоны в соответствии со значимостью точности аппроксимации в каждой зоне и использовать тренировочные множества, выбираемые непосредственно для соответствующей зоны. Заметим, что такой метод может найти применение и быть эффективным во всех случаях, когда имеется заданная нелинейная функция вход-выход и требуется осуществить синтез блока, воспроизводящего (аппроксимирующего) эту функцию с достаточной точностью и имеющего простую структуру.

4. Проведенные модельные исследования системы частотно-регулируемого ЭП показали, что предлагаемые решения обеспечивают системе регулирования скорости необходимые характеристики при более простой структуре регулятора. При достигнутом упрощении структуры следует ожидать снижения операционного времени контроллера, реализующего такой регулятор, на 50%, что, соответственно, позволит увеличить частоту модуляции инвертора до 10 кГц и выше.

5. Эффективным вариантом аппаратной реализации управляющей части системы IFOC с элементами искусственного интеллекта, в которой реализуемы рассмотренные структуры и алгоритмы регуляторов скоро-

сти, является использование программируемых логических интегральных схем типа FPGA (Field Programmable Gate Array). Такие интегральные схемы представляют собой совокупность большого числа функциональных базовых элементов, не имеющих жёстких электрических соединений между собой [7]. Необходимые электрические соединения этих элементов пользователь может многократно программировать сам в условиях эксплуатации путём загрузки с компьютера, что позволяет реализовать требуемую конфигурацию регулятора. Для лабораторных исследований рассматриваемой схемы электропривода и экспериментальной проверки предложенных решений авторами используется устройство FPGA типа «Spartan 3E» фирмы «Xilinx», возможности которого позволяют реализовать структуру IFOC с векторной ШИМ и регулятор скорости любого из исследуемых типов.

Список литературы

1. Bose B.K. Variable Power electronics and frequency drives. IEEE press, 1997.
2. Heber B., Xu L., Tang Y. Fuzzy logic enhanced speed control of an indirect field oriented induction machine drive // IEEE. Trans. One. Power. Electr. 1997. Vol. 12, N. 5. P. 772–778.
3. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня. М.: Знание, 1974. С. 5–49.
4. Шетате Б., Халдун А. Минимизация потерь энергии в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором при векторном управлении // Электричество. 2004. № 12. С. 31–37.
5. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия-Телеком, 2001.
6. Хилькевич В.В. Искусственные нейронные сети и их применение. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
7. Monmasson E., Cirstea M.N. FPGA design Methodology for Industrial Control Systems – A Review // IEE Tran on Ind Elec. 2007. Vol. 54, No. 4. P. 1824–1842.

Рафик Брадаи (Rafik Bradai) – докторант университета г. Бумердес (Boumerdes, Алжир), сотрудник лаборатории электрификации промышленных предприятий этого университета, преподаватель университета г. Блида. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Синтез регуляторов частотно-регулируемого асинхронного электропривода с использованием средств искусственного интеллекта» в 2001 г.

Бухемис Шетат (Boukhemis Chetate) – директор Научно-исследовательской лаборатории электрификации промышленных предприятий Бумердасского (BOUMERDES) университета (АЛЖИР), проф. Кандидатскую диссертацию защитил в 1989 г. на кафедре автоматизированного электропривода МЭИ

Ладыгин Анатолий Николаевич – доцент кафедры автоматизированного электропривода МЭИ(ТУ). Окончил МЭИ в 1972 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1979 г.

Оптимизация левитационного экрана электромеханического преобразователя усилий

АБДУЛЛАЕВ Я.Р.

Разработан метод определения и расчёта оптимальных значений основных параметров и размеров левитационного экрана электромеханического преобразователя усилий со ступенчатым магнитопроводом. Метод учитывает заданные значения температуры перегрева левитационного экрана, глубину проникновения электромагнитной волны в экран из алюминия и заданный диапазон изменения внешней силы действующей на экран. Приведён пример расчёта преобразователя усилий, основанный на разработанной инженерной методике расчёта.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь усилий, левитационный экран, обмотка возбуждения, рабочий ход, удельная магнитная проводимость воздушного зазора, оптимальные значения параметров

В автоматических системах управления технологическими процессами часто возникает потребность в управляемых электромеханических преобразователях усилий, позволяющих удерживать рабочий орган машин и механизмов в заданном вертикальном положении и автоматически изменять их вертикальное положение при переменной внешней силе [1,2]. Рассмотренный в статье управляемый электромеханический преобразователь усилий не требует дополнительных элементов (пружины, направляющих, редукторов, опор и т.д.), конструктивно достаточно просто и легко может согласоваться с внешним рабочим механизмом [3–5]. Принципиальная схема управляемого электромеханического преобразователя усилий (ЭМПУ) показана на рис. 1. ЭМПУ состоит из шихтованного ступенчатого магнитопровода M , обмотки возбуждения (OB) и левитационного экрана ($ЛЭ$). С $ЛЭ$ жёстко соединён силоводящий элемент ($СВЭ$), который передает создаваемое усилие F_3 ЭМПУ к рабочему механизму (PM) или воспринимает внешнее усилие P_x PM . В процессе работы ЭМПУ подъёмная сила F_3 компенсирует внешнюю силу P_x и силы тяжести P_B $ЛЭ$. При этом вертикальное положение $ЛЭ$ может изме-

The method of definition and calculation of optimum values of key parameters and the sizes levitation the screen of the electromechanical converter of efforts with step magnetic wire is developed. The method considers preset values of temperature of an overheat levitation the screen, depth of penetration of an electromagnetic wave in the screen from aluminium and the set range of change of external force acting on the screen. The example of calculation of the converter of the efforts, based on the engineering design procedure developed in clause is resulted.

Key words: the electromechanical converter of efforts, levitation the screen, a winding of excitation, a working course, specific magnetic conductivity of an air backlash, optimum values of parameters

ниться от X_{\min} до X_{\max} ($X_{\max} = X_{\min} - X_p$). Рабочий ход $ЛЭ$ X_p зависит от значения P_x и напряжения питания U_y . При $P_x = P_{\min}$ $ЛЭ$ находится на расстоянии X_{\max} от OB , а при $P_x = P_{\max}$ это расстояние минимальное и равно X_{\min} . Как правило, диапазон изменения внешнего усилия $P_x = P_{\min} \div P_{\max}$. Управление положением $ЛЭ$ X в пределах заданного диапазона изменения усилия P_x осуществляется автоматическим регулированием напряжения питания OB $U_y = U_{\min} \div U_{\max}$.

При создании таких преобразователей всё чаще возникает необходимость оптимизации геометрических размеров и отыскания общих закономерностей изменения взаимосвязанных параметров при наличии физических, энергетических и параметрических ограничений. Общие основы расчёта ЭМПУ с $ЛЭ$ приведены в [3, 4]. Однако вопросы оптимизации геометрических размеров $ЛЭ$, учитывающие взаимовлияния удельной магнитной проводимости рабочего воздушного зазора λ , геометрических размеров магнитной системы, температуры перегрева OB τ_1 и $ЛЭ$ τ_2 и рабочего хода X_p остались не решёнными.

Целью работы является определение оптимальных значений геометрических размеров $ЛЭ$ для заданных диапазонов изменений

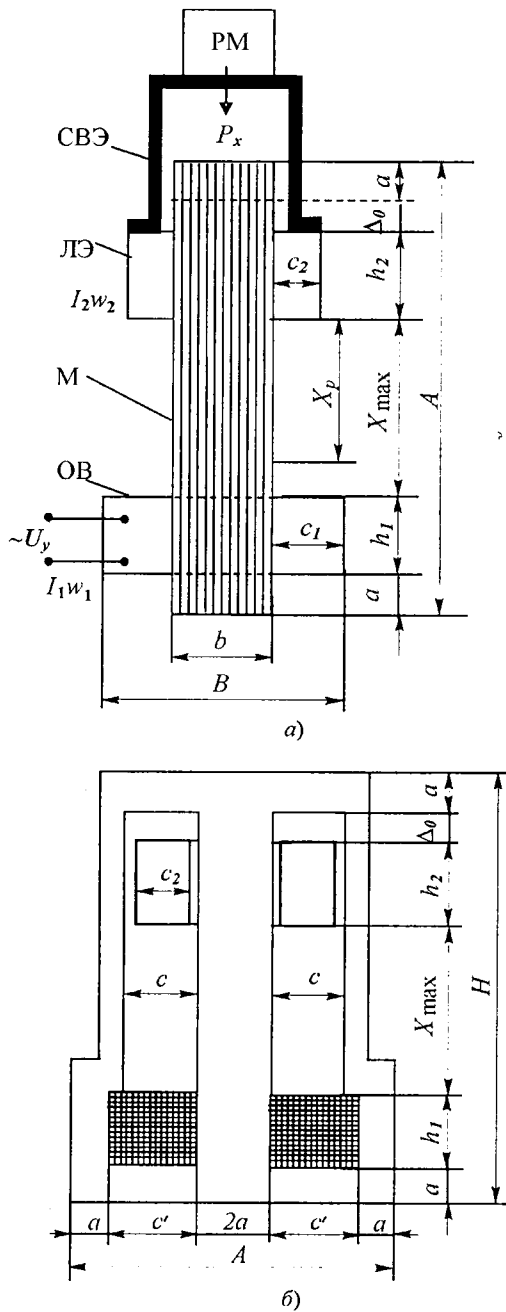


Рис. 1. Электромеханический преобразователь усилий с левитационным экраном

внешней силы $P_x = P_{\min} \div P_{\max}$ и напряжения управления $U_y = U_{\min} \div U_{\max}$, значения температуры перегрева ЛЭ τ_2 и глубины проникновения электромагнитной волны в сплошной ЛЭ из алюминия. В итоге решения поставленной задачи разработана инженерная методика расчёта ЭМПУ.

Исходные расчётные выражения

При формировании расчётной модели ЭМПУ учитываем следующее:

1. С увеличением внешней силы P_x увеличиваются токи в ОУ I_1 и ЛЭ I_2 , так как при

этом уменьшаются расстояние X между ОУ и ЛЭ и индуктивность системы L_1 . С увеличением токов I_1 и I_2 , температуры перегрева ОУ τ_1 и ЛЭ τ_2 возрастают.

2. С перемещением ЛЭ максимальное значение индукции B_{\max} в зоне расположения ОУ не изменяется и зависит от напряжения U_{\max} .

3. Магнитное поле в рабочем воздушном зазоре окна магнитопровода однородное, так как при этом выполнены условия: $m_a = b/a = 2 \div 6$; $m_c = b/c = 2 \div 6$. При этом электромеханическая жёсткость ЛЭ оказывается достаточно высокой [1].

4. Для заданного диапазона изменения усилий $P_x = P_{\min} \div P_{\max}$ условие левитации $F_3 = P_b + P_x$ выполняется всегда. Токи и температуры перегрева ОУ и ЛЭ, а X_p определяются из условия левитации.

5. Толщина ЛЭ c_2 определяется из условия $c_2 \leq \delta_r$, где глубина проникновения электромагнитной волны δ_r экрана из алюминия при промышленной частоте $f=50$ Гц составляет $14 \cdot 10^{-3}$ м.

Рассматриваемые особенности показывают, что геометрические размеры должны быть определены для $P_x = P_{\min} \div P_{\max}$, B_{\max} , $I_{1\max}$, и $I_{2\max}$ и U_y . Учитывая изложенное, составим математическую модель, состоящую из выражений:

1) токов и МДС ОУ и ЛЭ:

$$I_1 = \frac{k_u U_1}{\omega w_1^2 \lambda (h_0 + X)}; I_2 = b_2 k I_1; \quad (1)$$

$$F_1 = I_1 w_1 = J_1 k_{31} S_{01}; F_2 = J_2 k_{32} S_{02}; F_2 = b_2 F_1; \quad (2)$$

2) магнитной индукции в стали магнитопровода

$$B_{\max} = \frac{k_u U_1 \sqrt{2}}{\omega k_c w_1 S_c}; \quad (3)$$

3) подъёмной электродинамической силы и силы тяжести ЛЭ

$$F_3 = 0,5(I_1 w_1)^2 \lambda; P_b = g \gamma k_{32} S_{02} I_{cp2}; \quad (4)$$

4) координаты левитации

$$X = \frac{k_u U_1}{\omega w_1 \sqrt{2 \lambda (P_b + P_x)}} - h_0; \quad (5)$$

5) температуры перегрева ОУ и ЛЭ:

$$\tau_1 = \frac{P_1 + P_2}{k_T S_{oxl}}; \quad (6)$$

$$\tau_2 = \frac{P_2}{k_T S_{\text{ох}2}}, \quad (7)$$

где $k = w_1 / w_2$ – коэффициент трансформации; $b_2 = 0,98$ – коэффициент электромагнитной связи между $ОУ$ и $ЛЭ$; k_c – коэффициент заполнения стали; $k_T = 13 \text{ Вт/м}^2\text{С}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности охлаждения $ОУ$ и $ЛЭ$; $S_{\text{ох}1}$ и $S_{\text{ох}2}$ – площади поверхностей охлаждения $ОУ$ и $ЛЭ$; S_{01} и S_{02} – площади сечений $ОУ$ и $ЛЭ$; S_c – площадь сечения среднего стержня магнитопровода; $l_{\text{ср}2}$ – средняя длина витка $ЛЭ$; k_{31} и k_{32} – коэффициенты заполнения медью $ОУ$ и алюминием $ЛЭ$ ($k_{31} \approx 0,5 \div 0,7$; $k_{32} = 1$); $h_0 = (h_1 + n_\lambda h_2) / 3n_\lambda$ – обобщённый размер, определяемый через высоты h_1 и h_2 ; n_λ – безразмерный коэффициент, учитывающий ступенчатую форму магнитопровода; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $\gamma = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Мощность активных потерь для $ОУ$ и $ЛЭ$ определяется из выражений:

$$P_1 = I_1^2 r_1 = F_1^2 \frac{\rho_1 l_{\text{ср}1}}{k_{31} S_{01}} = F_1 \rho_1 J_1 l_{\text{ср}1}; \quad (8)$$

$$P_2 = I_2^2 r_2 = F_2^2 \frac{\rho_2 l_{\text{ср}2}}{k_{32} S_{02}} = F_2 \rho_2 J_2 l_{\text{ср}2}, \quad (9)$$

где $l_{\text{ср}1} = 2(2a + b + 2c') = l_{k1} + 4c_1$;
 $l_{\text{ср}2} = 2(2a + b + 2c) = l_{k2} + 4c_2$;
 $l_{k1} = 2(2a + b + \Delta_k)$; $l_{k2} = 2(2a + b + \Delta_0)$; $l_{k1} \approx l_{k2}$.
 Удельные электрические сопротивления ρ_1 и ρ_2 зависят соответственно от температуры перегрева τ_1 и τ_2 :

$$\rho_1 = \rho_{10} (\Delta'_{\text{ок}} + \alpha_M \tau_1); \quad (10)$$

$$\rho_2 = \rho_{20} (\Delta''_{\text{ок}} + \alpha_A \tau_2),$$

где $\alpha_M = 0,0043 \text{ 1/}^\circ\text{C}$; $\alpha_A = 0,0042 \text{ 1/}^\circ\text{C}$;
 $\rho_{10} = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\rho_{20} = 2,78 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
 $\Delta'_{\text{ок}} = 1 + \alpha_M (\theta_{\text{ок}} - 20) = 1 + 0,0043(35 - 20) = 1,063$;
 $\Delta''_{\text{ок}} = 1 + \alpha_A (\theta_{\text{ок}} - 20) = 1 + 0,0042(35 - 20) = 1,0645$.
 Из [3]

$$\lambda = 2\mu_0 m_c \sigma_B; \quad \lambda_B = 2\mu_0 m'_c \sigma'_B, \quad (11)$$

где $\sigma_B = 1 + \frac{2,92}{m_c} \lg\left(1 + \frac{\pi}{m_a}\right)$; $\sigma'_B = 1 + \frac{2,92}{m'_c} \lg\left(1 + \frac{\pi}{m_a}\right)$;
 $m_c = b/c$; $m'_c = b/c'$.
 Коэффициент

$$n_\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_B} = \frac{m_c \sigma_B}{m'_c \sigma'_B} = n_c \frac{\sigma_B}{\sigma'_B}, \quad (12)$$

где $n_c = c'/c = 1,2 \div 2,4$; $n_\lambda = 1,12 \div 2,16$, если $m_a = 2 \div 6$; $m_c = 2 \div 6$.

Индуктивности распределённых $ОУ$ и $ЛЭ$ зависят от удельных магнитных проводимостей λ и λ_B :

$$L_1 = L_{1s} + L_x + k^2 L_{2s} = w_1^2 \lambda (h_0 + X);$$

$$L_{2s} = \frac{1}{3} w_2^2 \lambda h_2, \quad (13)$$

где $L_x = w_1^2 \lambda X$; $L_{1s} = \frac{1}{3} w_1^2 \lambda_B h_1$; $h_0 = \frac{h_1 + n_\lambda h_2}{3n_\lambda}$;

$k = w_1 / w_2$; $w_2 = 1$.

Площади охлаждений $ОУ$ и $ЛЭ$

$$S_{\text{ох}1} = h_1 (l_{\text{ср}1} + 4c_1) = n_{e1} c_1 (l_{k1} + 8c_1); \quad (14)$$

$$S_{\text{ох}2} = 2l_{\text{ср}2} (c_2 + h_2) = 2(l_{k2} + 4c_2) (1 + n_{e2}) c_2. \quad (15)$$

Аналитическая связь между $S_{\text{ох}1}$ и $S_{\text{ох}2}$ определяется из (6), (7):

$$S_{\text{ох}1} = k_p S_{\text{ох}2} \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad (16)$$

где

$$k_p = 1 + \frac{P_1}{P_2}. \quad (17)$$

Определение оптимальных геометрических соотношений для ЛЭ

Оптимальные геометрические соотношения ЛЭ определяются для заданных значений коэффициента силы n_p , температуры перегрева τ_2 , коэффициента $n_{e2} = h_2 / c_2$, внешней силы P_x и глубины проникновения электромагнитной волны в материал экрана. Найдя минимальные значения n_{e2} для ряда значений τ_2 и λ , можно установить оптимальное соотношение для размеров ЛЭ. Используя выражения (6), (8) и (15), получим выражение температуры перегрева для ЛЭ:

$$\tau_2 = \frac{\rho_2 F_2^2}{2k_{32} k_T S_{02} (c_2 + h_2)}. \quad (18)$$

Из уравнений равновесия сил и МДС $F_3 = P_B + P_x$ и $F_2 = b_2 F_1$ с учётом выражения (4) находим аналитическую связь между F_2 и P_x , λ , S_{02} и $l_{\text{ср}2}$:

$$F_2^2 = \frac{2b_2^2}{\lambda} (P_x + P_B) = \frac{2b_2^2}{\lambda} (P_x + g\gamma k_{32} S_{02} l_{\text{ср}2}). \quad (19)$$

Далее учитываем соотношения:

$$l_{cp2} = 2n_{02}c_2 \frac{n_1}{m_a}; \lambda = 2\mu_0 m_c \sigma_B; S_{02} = c_2 h_2 = c_2^2 n_{e2};$$

$$c = n_{02}c_2; n_1 = 2m_a + 2m_c + m_a m_c;$$

$$c_2 + h_2 = c_2(1 + n_{e2}).$$

Подставив (19) в (18), получим:

$$S_{02}^2 - b'_1 S_{02} - b'_0 = 0; \quad (20)$$

$$n_{e2}^2 - b_1 n_{e2} - b_0 = 0. \quad (21)$$

Из (20), (21) получим:

$$S_{02} = \frac{b'_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{b'_1}{2}\right)^2 + b'_0}; n_{e2} = \frac{b_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{b_1}{2}\right)^2 + b_0}, \quad (22)$$

где

$$b'_1 = b_1 c_2^2; b'_0 = \tau'_2 c_2 \frac{P_x}{\lambda}; b_0 = \frac{b'_0}{c_2^4} = \tau'_2 \frac{P_x}{\lambda c_2^3}.$$

Здесь

$$\tau'_2 = \left(\frac{b_2^2 \rho_{20}}{k_{32} k_T}\right) \frac{1}{\tau_{T2}} = \left(\frac{0,98^2 \cdot 2,78 \cdot 10^{-8}}{13 \cdot 1}\right) \frac{1}{\tau_{T2}} =$$

$$= \frac{2,05 \cdot 10^{-9}}{\tau_{T2}}; \tau_{T2} = \frac{\tau_2}{1,064 + 0,0042 \tau_2};$$

$$\tau_{T0} = \frac{g \gamma \rho_{20}}{k_T \mu_0} = \frac{9,81 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 2,78 \cdot 10^{-8}}{13 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}} = 45,4^\circ \text{C};$$

$$n_0 = n_{02} b_2^2 \frac{\tau_{T0}}{\tau_{T2}} = 0,98^2 \cdot 1,1 \frac{45,4}{\tau_2} (1,064 + 0,0042 \tau_2) =$$

$$= 201,4 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{253,5}{\tau_2}\right); \quad (23)$$

$$b'_1 = n_0 m' - 1; m' = \frac{2\mu_0 n_1}{m_a \lambda}. \quad (24)$$

Представив

$$b_0 = \tau'_2 \frac{P_x (n_p - 1)}{\lambda c_2^3} n_0 m' n_{e2} (n_p - 1),$$

где $P_x = P_B (n_p - 1) = 2g \gamma k_{32} n_{02} c_2^3 \frac{n_1}{m_a}; n_p = 1 + \frac{P_x}{P_B},$

вместо уравнения (21) можно написать:

$$n_{e2}^2 - b' n_{e2} - n_0 m' n_{e2} (n_p - 1) = 0$$

и

$$n_{e2} = n_0 n_p m' - 1. \quad (25)$$

Толщина ЛЭ

$$c_2 = \sqrt[3]{\frac{2,05 \cdot 10^{-9} P_x}{b_2^2 n_{02} \tau_{T0} n_{e2} (n_p - 1) m' \lambda}}$$

$$\text{или } c_2 = \sqrt[3]{\frac{k' m_a P_x}{n_1 n_{e2} (n_p - 1)}}, \quad (26)$$

где $k' = 1 / (2g \gamma n_{02} k_{32}) = 1 / (2 \cdot 9,81 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 1,1) =$
 $= 17,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Н}.$

Из (26) следует, что толщина c_2 существенно зависит от заданной температуры τ_2 , проводимости рабочего зазора λ , внешней силы P_x и коэффициента силы n_p . Для уменьшения c_2 в первую очередь надо снизить коэффициент m_a и увеличить m_c . После определения n_{e2} и c_2 находится значение S_{02} .

Толщину c_2 можно определить также через известное значение тока I_2 , если использовать выражения:

$$\tau_2 = \frac{I_2^2 r_2}{k_T S_{ox2}} = \frac{I_2^2 \rho_{20} l_{cp2}}{k_T S_{ox2} S_{02}};$$

$$S_{ox2} = 2l_{cp2} (c_2 + h_2).$$

В этом случае

$$c_2 = \sqrt[3]{\frac{\rho_{20} I_2^2}{2k_T \tau_2 n_{e2} (n_{e2} + 1)}}, \quad (27)$$

где

$$I_2 = F_2 = I_2 w_2 = \frac{b_2}{w_1} \sqrt{\frac{2n_p P_x}{\lambda (n_p - 1)}}.$$

Коэффициент n_0 зависит только от температуры перегрева τ_2 , а коэффициент m' определяется через удельную магнитную проводимость λ .

Из выражений (24) и (25) следует, что при некоторых значениях λ функции $m'(\lambda)$ и $n_{e2}(\lambda)$ имеют максимумы и минимумы. Исследования показывают, что оптимальные значения размеров и параметров зависят от экстремумов функций $m'(m_a m_c)$ или $n_{e2}(m_a m_c)$. Используя производные

$$\frac{dn_{e2}}{dm_c} = \frac{dm'}{dm_c} = 0; \frac{dn_{e2}}{dm_a} = \frac{dm'}{dm_a} = 0,$$

получаем:

$$m_c - 2,92 \left(1 + \frac{1}{m_c} + \frac{2}{m_c}\right) \lg \left(1 + \frac{\pi}{m_a}\right) = 0;$$

$$\sigma_B m_a m_c (2 + m_c) - (2m_a + 2m_c + m_a m_c) \times$$

$$\times \left(\sigma_B m_c - \frac{2,92\pi}{\pi + m_a}\right) = 0.$$

Исследованием выражений (31) и (32) были установлены максимумы и минимумы функции $m'(m_a, m_c)$ для диапазонов $m_a = 2 \div 6$ и $m_c = 2 \div 6$.

Максимумы:

$$m' = 1,876 \text{ при } \lambda = 8,03 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м } (m_a = 2, m_c = 2);$$

$$m' = 1,924 \text{ при } \lambda = 13,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м } (m_a = 2, m_c = 4);$$

$$m' = 1,945 \text{ при } \lambda = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м } (m_a = 2, m_c = 6).$$

Минимумы:

$$m' = 1,828 \text{ при } \lambda = 6,87 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м } (m_a = 4, m_c = 2);$$

$$m' = 1,617 \text{ при } \lambda = 11,4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м } (m_a = 6, m_c = 4);$$

$$m' = 1,531 \text{ при } \lambda = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м } (m_a = 6, m_c = 6).$$

На графике функции $m'(\lambda)$ показаны координаты точек экстремумов (рис.2). Согласно (25) коэффициент n_{e2} пропорционален параметру m' , поэтому характер изменения функций $m'(\lambda)$ и $n_{e2}(\lambda)$ аналогичен рис. 3. Из формулы (26) видно, что толщина ЛЭ c_2 зависит от коэффициентов n_{e2} , m_a и m_c . На основе этого выражения была рассчитана зависимость $c_2(\lambda)$ (рис. 3). Сравнение зависимостей $c_2(\lambda)$ и $n_{e2}(\lambda)$ показывает, что размер c_2 и коэффициент n_{e2} при изменении λ изменяются в противоположные стороны. От этого зависит характер изменения остальных параметров и размеров устройства, а также их взаимосвязь, функциональные зависимости которых приведены на рис. 4. Из графиков обобщённых зависимостей $\Pi'_2(\lambda)$ и $\Pi''_2(\lambda)$ видно, что размеры a , b и площадь сечения S_c сердечника с увеличением λ возрастают. При этом также возрастают плотность тока J_2 и активная мощность P_2 ЛЭ. Однако увеличение λ приводит к уменьшению F_1 и числа витков w_1 , но при этом ток I_1 возрастает. Приведённые графики наглядно показывают взаимосвязь между параметрами и размерами, учёт которых важен для определения их оптимальных значений. Например, при неправильном выборе удельной магнитной проводимости λ ширина стержня сердеч-

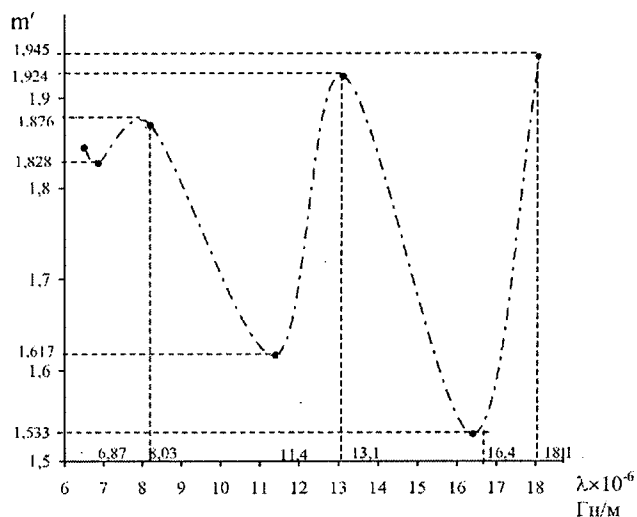


Рис. 2. Функциональная зависимость $m'(\lambda)$

ника может оказаться незначительной, а толщина пакета сердечника b значительной. В результате габаритный размер B ЭМПУ (рис. 1) по сравнению с габаритным размером A окажется недопустимо большим.

Определение рабочего хода при переменной внешней силе

При изменении P_x от P_{\min} до P_{\max} ток в ОУ изменяется от I_{\min} до I_{\max} :

$$I_{\min} = \frac{1}{w_1} \sqrt{\frac{2}{\lambda} (P_B + P_{\min})};$$

$$I_{\max} = \frac{1}{w_1} \sqrt{\frac{2}{\lambda} (P_B + P_{\max})}.$$

Согласно (1)

$$I_{\min} = \frac{k_u U_1}{\omega w_1^2 \lambda (h_0 + X_{\max})};$$

$$I_{\max} = \frac{k_u U_1}{\omega w_1^2 \lambda (h_0 + X_{\min})}.$$

Кратность тока в ОУ

$$k_I = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \sqrt{\frac{P_B + P_{\max}}{P_B + P_{\min}}} = \sqrt{\frac{n'_p}{n_p}} = \frac{h_0 + X_{\max}}{h_0 + X_{\min}},$$

где $n'_p = 1 + P_{\min} / P_B$.

Координаты левитации при $P_x = P_{\min}$ и $P_x = P_{\max}$ определяются согласно (5):

$$X_{\max} = \frac{n'}{\sqrt{P_B + P_{\min}}} - h_0;$$

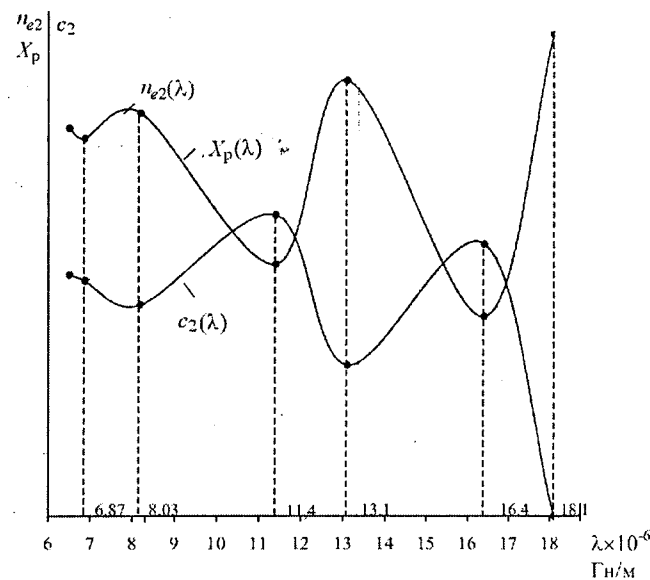


Рис. 3. Функциональные зависимости $n_{e2}(\lambda)$, $X_p(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$

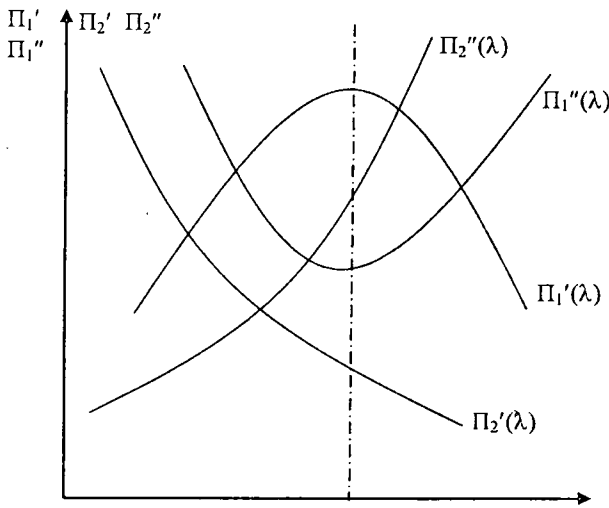


Рис. 4. Графики обобщённых функциональных зависимостей параметров и размеров от удельной проводимости λ : $\Pi_1'(\lambda) - b, c_1, c_2$; $\Pi_1''(\lambda) - m', n_{e2}, h_2, I_1$; $\Pi_2'(\lambda) - c_2, h_2, S_{02}, w_1, F_1, F_2$; $\Pi_2''(\lambda) - a, b, S_c, j_2, P_2, I_1$

$$X_{\min} = \frac{n'}{\sqrt{P_B + P_{\max}}} - h_0.$$

Тогда рабочий ход

$$X_p = X_{\max} - X_{\min} = \frac{n'_p b'_p}{\sqrt{P_{\max}}},$$

где $n' = \frac{k_u U_1}{\omega w_1 \sqrt{2\lambda}}$; $n_p = 1 + \frac{P_{\max}}{P_B}$; $n_B = 1 + \frac{P_{\min}}{P_B}$;

$$b'_p = \sqrt{1 - \frac{1}{n_p} \left(\sqrt{\frac{n_p}{n_B}} - 1 \right)}; P_B = \frac{P_{\max}}{n_p - 1}.$$

Если заданы X_{\max} и X_{\min} , то

$$h_0 = \frac{X_{\max} - X_{\min} \sqrt{\frac{n_p}{n_B}}}{\sqrt{\frac{n_p}{n_B}} - 1}.$$

Поскольку

$$h_0 = \frac{h_1}{3n\lambda} + \frac{h_2}{3},$$

то

$$h_1 = 3n\lambda \left(h_0 - \frac{h_2}{3} \right).$$

Часто $P_{\min} = 0$, $P_x = P_{\max}$, в этом случае $n_B = 1$ и

$$b'_p = b_p = \sqrt{1 - \frac{1}{n_p} (\sqrt{n_p} - 1)};$$

$$X_p = \frac{n'_p b'_p}{\sqrt{P_x}}; h_0 = (X_{\max} - X_{\min} \sqrt{n_p}) \frac{1}{\sqrt{n_p - 1}}. \quad (28)$$

Кратность тока

$$k_I = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \sqrt{\frac{P_B + P_{\max}}{P_B + P_{\min}}}.$$

Коэффициент n' зависит от удельной магнитной проводимости λ , поэтому рабочий ход X_p является функцией размеров магнитопровода и толщины ЛЭ c_2 . Чтобы эту зависимость представить в явной форме, определим:

$$\frac{k_u U_1}{\omega w_1} = \frac{B_{\max}}{\sqrt{2}} k_c S_c = \frac{k_c B_{\max}}{\sqrt{2}} \frac{2m_c^2 c^2}{m_a};$$

$$n' = \frac{k_c B_{\max} m_c^2 c^2}{m_a \sqrt{\lambda}}, \quad (29)$$

тогда согласно (28)

$$X_p = k_c B_{\max} n_{02}^2 c_2^2 \frac{b_m b_p}{\sqrt{P_x}}, \quad (30)$$

где

$$S_c = 2ab = \frac{2m_c^2 c^2}{m_a}; c = n_{02} c_2; b_m = \frac{m_c^2}{m_a \sqrt{\lambda}}.$$

Из (30) следует, что для обеспечения заданных ЛЭ X необходимо изменить коэффициент b_m и толщину c_2 , что возможно выбором соответствующего значения проводимости λ .

В табл. 1 и 2 приведены расчётные значения коэффициентов b_m и b_p . Зависимость $b_m(m_a, m_c)$ при постоянном значении m_c с увеличением m_a уменьшается, а при постоянном значении m_a с увеличением m_c — возрастает. Для диапазонов $m_a = 2 \div 6$ и $m_c = 2 \div 6$ имеем $b_m = 264,4 \div 4230,9$. Минимальное b_m при $m_a = 6$ и $m_c = 2$, а максимальное — при $m_a = 2$ и $m_c = 6$. Учитывая эти закономерности, для уменьшения рабочего хода X_p , необходимо уменьшить m_c и увеличить m_a (рис. 5).

Таблица 1

Значения коэффициента b_m

m_c	m_a				
	2	3	4	5	6
2	705,8	493,2	381,5	312,1	266,4
3	1388,7	957,8	734,7	597,0	503,65
4	2210,3	1520,7	1159,5	939,6	789,8
5	3164,8	2166,1	1647	1331,6	1117,6
6	4230,9	2885,0	2189,3	1767,2	1481,6

Таблица 2 где
Значения коэффициента b_p

n_p	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
b_p	0,293	0,45	0,597	0,736	0,866	0,989	1,105	1,217	1,323

Значение коэффициента b_p с увеличением n_p возрастает. Чем больше n_p , тем меньше сила тяжести P_B , и следовательно, меньше размеры c_2 и h_2 . Однако c_2 и h_2 определяются заданным значением температуры перегрева τ_2 , т.е. коэффициентом $n_{e2}=h_2/c_2$. Поэтому для удобства анализа влияния коэффициентов n_{e2} и n_p на рабочий ход подставим значение c_2 из формулы (26) в (30). Тогда

$$X_p = k_c B_{\max} n_{02}^2 b_m \sqrt[6]{P_x} \sqrt[3]{\left(\frac{k'm_a}{n_{e2}n_1}\right)^2} m_p, \quad (31)$$

$$m_p = \frac{(\sqrt{n} - 1)^3}{\sqrt{n_p^3(n_p - 1)}}$$

Пример расчёта. Заданы: напряжение и частота источника питания $U_1=220$ В, $\omega=314$; максимальное значение внешней силы $P_x=10$ Н; коэффициент силы $n_p=5$; температура перегрева ЛЭ $\tau_2=50^\circ$ С. Требуется определить оптимальные значения параметров и размеров ЛЭ.

1. Для удобства составим табл. 3, где занесены максимумы и минимумы коэффициента m' для диапазонов $m_a=2\div 6$ и $m_c=2\div 6$. С учётом $\tau_2=50^\circ$ С определяются n_0 и n_{e2} из формул (23) и (25). Минимальное $m'=1,533$ при $\lambda=16,4\cdot 10^{-6}$ Гн/м ($m_a=m_c=6$). При этом $n_0=1,222$, $n_{e2}=8,367$, $n_1=60$, $b_m=14,816\cdot 10^{-2}$.

2. Определяем размеры:

Таблица 3

Результаты оптимизационного расчёта ЛЭ

$\lambda \cdot 10^{-6}$, Гн/м	6,36	6,87	8,03	11,4	11,9	13,1	16,4	16,9	18,1
m_a / m_c	6/2	4/2	2/2	6/4	4/4	2/4	6/6	4/6	2/6
n_1	28	20	12	44	32	20	60	44	28
m'	1,842	1,828	1,876	1,617	1,69	1,924	1,531	1,633	1,945
n_{e2}	10,255	10,169	10,462	8,88	9,3259	10,756	8,354	8,978	10,884
$b_m \cdot 10^{-2}$	2,644	3,815	7,058	7,898	11,595	22,103	14,816	21,893	42,309
$c_2 \cdot 10^{-3}$, м	9,642	9,449	8,808	8,701	8,316	7,36	8,008	7,573	6,554
$X_p \cdot 10^{-3}$, м	14,342	19,87	31,95	34,89	46,79	69,86	55,438	73,26	106,04
F_1 , А	1943,0	1869,5	1729,2	1451,25	1420,4	1353,8	1209,97	1191,9	1151,7
F_2 , А	1904,14	1832,11	1694,62	1422,23	1392,0	1326,724	1185,77	1168,062	1128,67
$S_{02} \cdot 10^{-6}$, м ²	953,4	908,0	811,65	672,28	645,0	582,65	535,7	514,89	467,5
$J_2 \cdot 10^6$, м ²	1,997	2,018	2,0879	2,116	2,158	2,277	2,213	2,269	2,414
$S_{02} \cdot 10^{-6}$, м ²	21485,2	21938,6	23475,7	24135,1	25136,2	28020,0	26393,6	27696,5	31445,3
P_2 , Вт	13,965	14,26	15,26	15,69	16,34	18,213	17,156	18,003	20,439

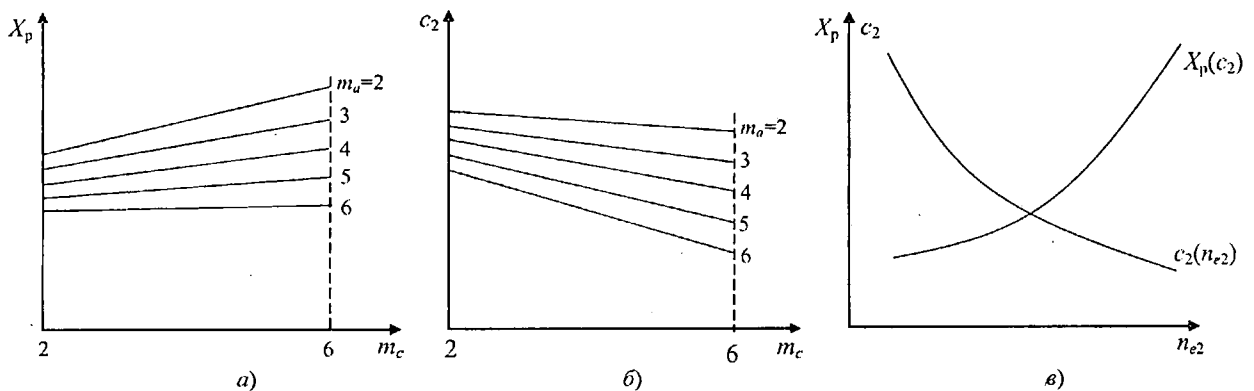


Рис. 5. Зависимости геометрических размеров от безразмерных коэффициентов m_a, m_c, n_{e2} (а и б) и рабочего хода X_p от толщины экрана c_2 (в)

$$c_2 = 3 \sqrt{\frac{k'm_a P_x}{n_1 n_{e2} (n_p - 1)}} = 8,008 \cdot 10^3 \text{ м};$$

$$h_2 = n_{e2} c_2 = 66,9 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$c = 1,1 c_2 = 8,809 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad b = m_c = 52,854 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$a = b/m_a = 8,809 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$l_{cp2} = 2(2a + b + 2c) = 176,18 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$l_{k2} = l_{cp2} - 4c_2 = 144,148 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

3. Находим:

$$S_{ox2} = 2l_{cp2}(c_2 + h_2) = 26394,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$S_{02} = c_2 h_2 = 535,7352 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$S_c = 2ab = 931,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$F_1 = F_{1\max} = \sqrt{\frac{2}{\lambda} (P_B + P_x)} = 1234,662 \text{ А};$$

$$F_2 \max = 0,98 F_1 = 1209,97 \text{ А};$$

$$w_1 = \frac{k_u U_1 \sqrt{2}}{\omega k_c B_c S_c} = 740,23; \quad P_B = \frac{P_x}{n_p - 1} = 2,5 \text{ Н}.$$

5. Определяем токи ОУ и ЛЭ:

$$I_{2\max} = \frac{F_{1\max}}{w_1} = 1,67 \text{ А};$$

$$I_{2\max} = F_2 \max = 1209,97 \text{ А}.$$

6. Плотность тока и мощность активных потерь в ЛЭ

$$J_2 = \frac{I_2}{S_{02}} = \frac{1209,97}{535,7352 \cdot 10^{-6}} = 2,26 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2;$$

$$P_2 = F_2 J_2 \rho_2 l_{cp2} = 17,05 \text{ Вт},$$

$$\text{где } \rho_2 = 2,78 \cdot 10^{-8} (1,064 + 0,0042 \cdot 50) = 3,542 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

7. Проверяем заданную температуру перегрева:

$$\tau_2 = \frac{P_2}{k_T S_{ox2}} = 49,7^\circ \text{С}.$$

8. Определяем коэффициенты:

$$n_1 = 2m_a + 2m_c + m_a m_c = 2 \cdot 6 + 2 \cdot 6 + 6 \cdot 6 = 60;$$

$$m' = \frac{2\mu_0 n_1}{m_a \lambda} = \frac{2 \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \cdot 60}{6 \cdot 16,4 \cdot 10^{-6}} = 1,533;$$

$$n_{e2} = n_0 m' n_p - 1 = 1,222 \cdot 1,533 \cdot 5 - 1 = 8,367;$$

$$b_m = \frac{m_c^2}{m_a \sqrt{\lambda}} = \frac{6^2}{\sqrt{16,4 \cdot 10^{-6}}} = 14,816 \cdot 10^{-2};$$

$$b_p = (\sqrt{n_p} - 1) \sqrt{1 - \frac{1}{n_p}} = (\sqrt{5} - 1) \sqrt{1 - \frac{1}{5}} = 1,1056.$$

9. Определяем рабочий ход ЛЭ:

$$X_p = k_c B_{\max} (n_{02} c_2)^2 \frac{b_m b_p}{\sqrt{P_x}} = 0,92 \cdot 1,5 (1,1 \cdot 8 \cdot 10^{-3})^2 \frac{14,816 \cdot 1,1056 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{10}} = 55,4 \cdot 10^{-3}.$$

При $P_x = 30 \text{ Н}$ $c_2 = 11,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $X_p = 66,273 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, т.е. для больших значений усилий P_x размеры c_2 и X_p возрастают.

В табл. 2 приведены результаты расчёта для всех значений удельной магнитной проводимости λ . Выбираем значения c_2 и X_p из табл. 1 и составляем табл. 4 и 5, где видно влияние коэффициентов m_a и m_c на толщину c_2 и рабочий ход X_p ЛЭ. С ростом m_a толщина c_2 и рабочий ход X_p увеличиваются, а с повышением m_c толщина c_2 уменьшается, но при этом рабочий ход X_p возрастает.

Таблица 4

Значения толщины ЛЭ c_2 (в миллиметрах)

m_c	m_a				
	2	3	4	5	6
2	8,812	9,239	9,449	9,569	9,642
3	7,957	8,5098	8,8167	9,0084	9,136
4	7,361	7,967	8,316	8,5425	8,7012
5	6,9111	7,54	7,9113	8,155	8,328
6	6,554	7,1908	7,573	7,828	8,0092

Таблица 5

Значения величин рабочего хода X_p (в миллиметрах)

m_c	m_a				
	2	3	4	5	6
2	31,978	24,564	19,874	16,675	14,348
3	51,3	40,47	33,323	28,268	24,528
4	69,879	56,32	46,787	40,007	34,89
5	88,2	71,854	60,147	51,671	45,23
6	106,04	87,04	73,26	63,182	55,455

Выводы

1. С учётом особенностей работы ЭМПУ составлена математическая модель, состоящая из выражений токов, МДС и температур перегрева ОВ и ЛЭ, координаты левитации, подъёмной электродинамической силы и силы тяжести ЛЭ. Математическая модель учитывает заданный диапазон изменения внешней силы, действующей на ЛЭ.

2. Получены максимальное и минимальное значения удельной магнитной проводимости рабочего воздушного зазора для конкретных отношений геометрических размеров магнитопровода. На основе этих отношений определены оптимальные значения геометрических размеров ЛЭ, которые обеспечивают

заданные значения допустимого перегрева ЛЭ и параметров технического задания на проектировании ЭМПУ.

3. Найдена функциональная зависимость рабочего хода от внешних усилий, магнитной индукции в стали, геометрических размеров магнитопровода и ЛЭ. Найденная аналитическая зависимость позволяет определить минимальное значение рабочего хода при заданных ограничениях габаритных размеров ЭМПУ.

4. Разработана инженерная методика расчёта и приведён пример расчёта ЛЭ.

Список литературы

1. Измерения в промышленности. Справочник / Под ред. П.Парфоса. М.: Металлургия, 1980.

2. Хофман Д. Техника измерений и обеспечение качества. М.: Энергоатомиздат, 1983.

3. Абдуллаев Я.Р. Теория и применения многофункциональных линейных индукционных подвесов. Баку: Военное издательство, 1996.

4. Абдуллаев Я.Р. Электромеханические преобразователи с использованием принципа индукционной подвески // Электротехника. 1979. №9. С.19–22.

5. Абдуллаев Я.Р. Теория магнитных систем с электромагнитными экранами. М.: Наука, 2002.

Абдуллаев Яшар Рухулла оглы – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматизация промышленных установок» Азербайджанской государственной нефтяной академии, доктор технических наук. Окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНХ) им.М.Азизбекова в 1963 г. Докторскую диссертацию по теме «Теория и применение многофункциональных линейных индукционных подвесов» защитил в 1998 г. в Азербайджанском НИИ энергетики и энергопроекта.

Энергетические соотношения при использовании эффекта электрогидравлического удара в борьбе с подводным терроризмом

ЩЕРБАКОВ Г.Н., ШЛЫКОВ Ю.А., БРОВИН А.В., УСМАНОВ Р.И.

Предложено использовать эффект электрогидравлического удара для борьбы с подводным терроризмом. Показано, что при приемлемых энергетических затратах возможно силовое воздействие на нарушителя в воде на расстояниях в несколько десятков метров.

Ключевые слова: электрогидравлический удар, подводный терроризм, исследования

The effect of electro hydraulic knock in the struggle with submerged terrorism is offered to be used. It is proved that under acceptable power costs force impact on violator in the water on the distance of some tens meters is possible.

Key words: electro hydraulic knock, submerged terrorism, researches

Одна из важнейших проблем человечества в XXI в. – это борьба с терроризмом, причём подводное направление является сегодня одним из самых незащищённых от возможного нападения террористов. Особую опасность представляют подводные боевые пловцы, способные скрытно приблизиться к любому объекту и нанести по нему удар [1–3]. Наиболее вероятными объектами террористического нападения могут быть атомные, тепловые и гидроэлектростанции, авто- и железнодорожные мосты, гидротехнические сооружения. Не исключены также нападения на танкеры, военные корабли, а также на суда с VIP персонами.

В настоящее время основным реальным способом противодействия подводному терроризму является гранатометание [4]. Однако применение таких средств возможно далеко не всегда, особенно в мирное время вблизи береговой полосы. В особых случаях для борьбы с подводными диверсантами используются боевые пловцы – вблизи прикрываемого объекта. В перспективе предлагается создавать дорогостоящие специальные роботизированные автономные подводные аппараты, осуществляющие обнаружение, распознавание и уничтожение подводных диверсантов на охраняемой акватории, причём для поражения предлагается использовать мало-

габаритные торпеды и автоматические установки подводной стрельбы [5].

Одним из перспективных способов активного воздействия на подводного нарушителя, разрабатываемым в России, является использование эффекта электрогидравлического удара (ЭГУ). Однако в настоящее время отсутствуют конкретные инженерные методики, позволяющие создать подобные установки для защиты акватории. Хотя этот эффект используется в промышленности более 50 лет, созданное оборудование является эксклюзивным («штучным»), разработанным для конкретных технологических задач (штамповки металлических изделий, дробления различных материалов, бурения скважин, очистки металлических поверхностей от ржавчины и т.д.), все процессы описываются для малых объёмов (до нескольких кубических метров) [6–8]. В физике самого эффекта остается ещё много не ясного. Научные дискуссии ведутся до сих пор. Имеющаяся информация является по сути «размытой» научно-исследовательской, а не «чёткой» инженерно-конструкторской. Конкретная информация о применении ЭГУ для воздействия на биологические объекты (боевых пловцов, дельфинов и пр.) отсутствует. Поэтому данное направление является, в определенной степени, пионерным. Отличительной чертой этого процесса является то, что преобразование электрической энергии в механическую совершается без промежуточных звеньев. Давление в канале разряда между высоковольтными электродами (характерные расстояния единицы – десятки сантиметров) может достигать десятков тысяч атмосфер. Значение напряжения, как правило, лежит в пределах от 10 до 100 кВ. При этом время самого электрического разряда составляет,

чаще всего, единицы–десятки микросекунд. Такие времена характерны также при взрывах небольших зарядов (десятки граммов – единицы килограммов) из обычного тротила.

Упрощённая электрическая схема установки ЭГУ приведена на рис. 1.

В первом приближении можно считать, что электрическая цепь разряда представляет собой последовательный колебательный контур с заданными индуктивностью, ёмкостью и нелинейным активным сопротивлением, определяемым, в основном, меняющимся со временем сопротивлением канала разряда. Активные сопротивления высоковольтного конденсатора и короткого отрезка коаксиального кабеля (сотые доли ома) намного меньше, чем сопротивление канала разряда в воде (единицы ом). Ёмкость высоковольтного конденсатора (единицы – сотни микрофарад) намного больше собственной ёмкости коаксиального кабеля. Электрические характеристики процесса разряда описываются уравнением колебательного контура:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU}{dt} + \frac{U}{LC} = 0, \quad (1)$$

где R – общее активное сопротивление контура разряда.

Основная трудность, возникающая при рассмотрении этого процесса, связана с определением переменного во времени сопротивления канала разряда, зависящего от плотности частиц (примесей в пресной воде) и температуры в канале [8,9]. На практике, в большинстве случаев процесс является аperiodическим [9].

Постоянная времени разряда в воде, в первом приближении, будет определяться выражением:

$$\tau_p \approx R_e(0)C, \quad (2)$$

где $R_e(0)$ – минимальное эквивалентное электрическое сопротивление канала разряда, Ом.

При ёмкости высоковольтного конденсатора от единиц до десятков микрофарад длительность процесса разряда будет, как уже отмечалось, ориентировочно составлять единицы–десятки микросекунд. Т.е. этот процесс по длительности сопоставим с длительностью взрыва обычного небольшого заряда бризантного взрывчатого вещества (тротила и др.) После мощного короткого электрического разряда в воде возникает сложный гидродинамический процесс в виде пульсаций, который длится значительно больше, чем сам разряд – до нескольких сотен микросекунд. Энергия, выделяющаяся в канале раз-

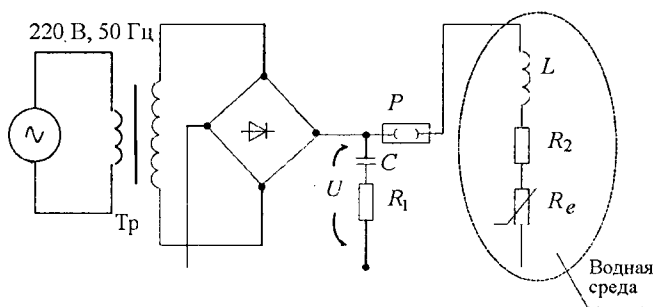


Рис. 1. Упрощённая электрическая схема установки электрогидравлического удара: T_p – повышающий трансформатор; C – ёмкость высоковольтного конденсатора; R_1 – внутреннее активное сопротивление высоковольтного конденсатора; P – воздушный («ускоряющий») разрядник; L – индуктивность высоковольтного коаксиального кабеля; R_2 – активное сопротивление высоковольтного кабеля; R_e – нелинейное активное сопротивление канала разряда в воде

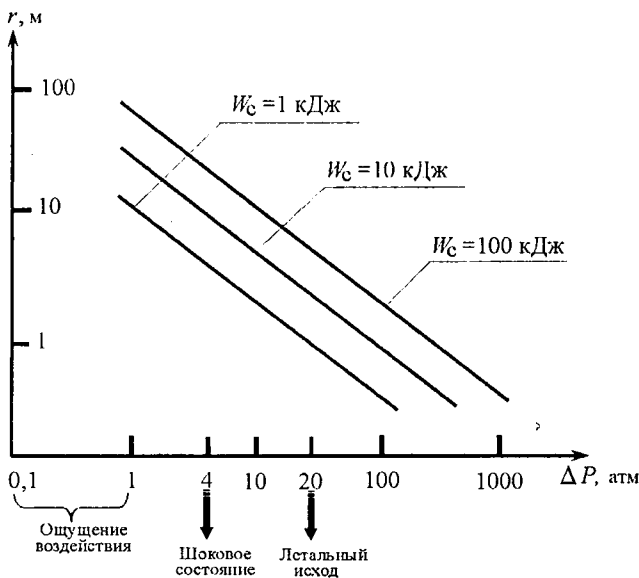


Рис. 2. Зависимости дальности действия ЭГУ на легководолаза в воде в зависимости от вида воздействия (предварительная теоретическая оценка)

ряда, расходуется в основном на работу, совершаемую каналом при расширении (около 50%) и на нагрев воды в канале разряда [7–9]. Работа, совершаемая каналом, подразделяется на энергию волн сжатия, излучаемую на стадии разряда (до 20%) и на энергию пульсаций газового пузыря, равную потенциальной энергии пузыря в момент максимального объема (до 30%). Энергия пульсаций постепенно расходуется на излучение волн сжатия и разряжения и на другие потери. Доля энергии разряда, формирующего ударную волну в «дальней зоне» (на расстоянии от единиц до сотен метров) может достигать (при оптимальных условиях) 30–35%. Это фактически и есть коэффициент преобразования (η) электрической энергии, накопленной в конденсаторах, в механическую энергию ударной волны, используемой потом в практических целях. Коэффициент η зависит от:

- проводимости воды;
- формы электродов;
- расстояния между электродами;
- материалов электродов;
- эквивалентного внутреннего сопротивления установки ЭГУ и ряда других факторов.

Ориентировочно, необходимая энергия должна быть от единиц до нескольких сотен килоджоулей. На рис. 2 изображены теоретические зависимости, позволяющие оценить дальности воздействия на легкого водолаза (в обычном снаряжении) в зависимости от требуемого характера воздействия и значения энергии импульсных конденсаторов установки на основе ЭГУ. При получении данных оценочных зависимостей использовалась известная формула Коула для расчёта давления на фронте ударной волны в воде при взрыве заряда тротила [10]. Используя эту формулу, а также известное усреднённое значение удельной энергии взрывчатого превращения для тротила: $Q_0 = 4,2 \cdot 10^6$ Дж/кг, получим выражение, позволяющее приблизительно оценить давление на фронте ударной волны в воде, создаваемой установкой ЭГУ:

$$\Delta P \approx 1,2 \left(\frac{\sqrt[3]{\eta C U^2}}{r} \right)^{1,13}, \quad (3)$$

где C – ёмкость конденсаторной батареи, Φ ; U – напряжение на конденсаторах, В; η – коэффициент преобразования электрической энергии разряда в механическую энергию ударной волны ($0 < \eta < 0,35$).

Как известно из работ других авторов, механическая энергия электровзрыва в пресной воде достигает, чаще всего только около 25% электрической энергии, накопленной в конденсаторах установки на основе ЭГУ [6,8]. Эта цифра использовалась при расчёте оценочных зависимостей на рис. 2. Из него вид-

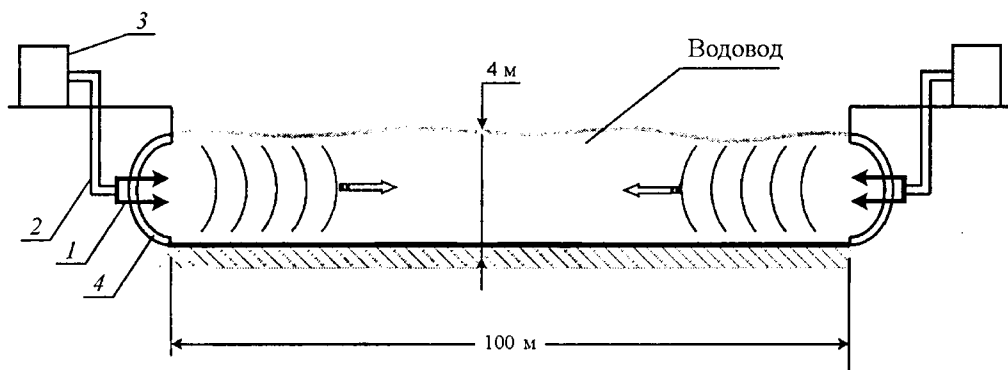


Рис. 3. Использование установок на основе ЭГДУ для защиты водовода АЭС, ГЭС от проникновения легководолазов (вариант): 1 – разрядник; 2 – высоковольтный кабель; 3 – генератор высоковольтных импульсов; 4 – фокусирующий рефлектор

но, что даже при весьма небольшой энергии конденсаторов (1кДж), дальность боевого воздействия на легководолаза в воде составляет до 10 м. При больших энергиях дальность, соответственно, возрастает. Масса существующих серийных высоковольтных конденсаторов — в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен килограммов. В перспективе следует ожидать снижение их массы, причём масса конденсаторов составляет до 60–70% массы всего генератора высоковольтных импульсов.

Возможный вариант практической реализации ЭГУ приведён на рис. 3.

Основной задачей в дальнейших исследованиях будет оптимизация всех элементов установки на основе ЭГУ и, прежде всего, излучателей ударных волн в водной среде. Необходимо поднять их электромеханический КПД. Не исключено также создание направленных излучателей ударных волн в пресной и морской воде.

Так как защищаемые объекты на побережье внутренних акваторий или моря являются стационарными или временно стационарными (плавучие АЭС, плавучие причалы и т.д.), то массогабаритные характеристики установок на основе ЭГДУ большого влияния на их использование не оказывают. Поэтому в настоящее время имеются технические возможности практической реализации метода электрогидроудара для борьбы с нарушителями в воде. Однако следует признать, что при использовании ЭГУ в морской воде, обладающей большей электропроводимостью необходимо решить ряд трудностей, связанных с уменьшением η . Для уменьшения средней потребляемой мощности целесообразно использовать установку ЭГУ совместно со

средствами обнаружения легководолаза в воде. Последнее будет включать установку ЭГУ только при наличии нарушителя. Средство обнаружения может быть создано на основе гидроакустической станции.

Предварительные экспериментальные исследования в пресноводном измерительном бассейне с размерами 7×3×2 м подтвердили удовлетворительную достоверность формулы (3).

При экспериментах использовалась портативная установка ЭГУ (рис. 4) с параметрами: $U=100$ кВ; $W_c = 1,25$ кДж. На расстоянии от разрядника 1–5 м измеренное импульсное давление в воде составляло несколько атмосфер, что соответствует зависимости на рис. 2. Импульсный датчик давления заранее калибровался в открытом водоёме (озеро 150×100×4 м) с использованием формулы Коула. В качестве эталонного источника импульсного давления применялся электродетонатор ЭДП (тротиловый эквивалент 1,5 г, что соответствует 6,3 кДж).

Список литературы

1. Морская радиоэлектроника / Под ред. В.А. Кравченко СПб.: Политехника, 2003.
2. Удинцев Д.Н. Мониторинг ограниченного объема водного пространства // Специальная техника. 2003. № 2. С. 16–19.
3. Шемигон Н.Н., Петраков А.В. Охрана объектов. Техника и технологии. М.: Энергоатомиздат, 2005.
4. Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Оценка возможности создания средств защиты акватории на основе использования электрогидравлического эффекта // Специальная техника. 2003. № 6.
5. Пат. 2269449 РФ, МПК В63G 8/00. Способ защиты охраняемой акватории от подводных диверсантов и устройства его осуществления / Илларионов Г.Ю., Ёнешин А.Д. // Бюл. 2006. № 4.
6. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. М.: Машиностроение, 1977.
7. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979.
8. Физические основы электрического взрыва. Сборник научных трудов / Под ред. Г.А. Гулого. Киев: Наукова думка, 1983.
9. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971.
10. Коул Р. Подводные взрывы. М.: Изд. иностр. лит., 1950.

Щербаков Григорий Николаевич – профессор, доктор техн. наук, генеральный директор ООО НТЦ «Зонд-Р».

Шлыков Юрий Александрович – сотрудник ОАО «ГидроОГК» (Федеральная гидрогенерирующая компания) канд. техн. наук.

Бровин Андрей Валерьевич – научный сотрудник ООО НТЦ «Зонд-Р», канд. техн. наук.

Усманов Рашид Ильнурович – инженер ООО НТЦ «Зонд-Р».

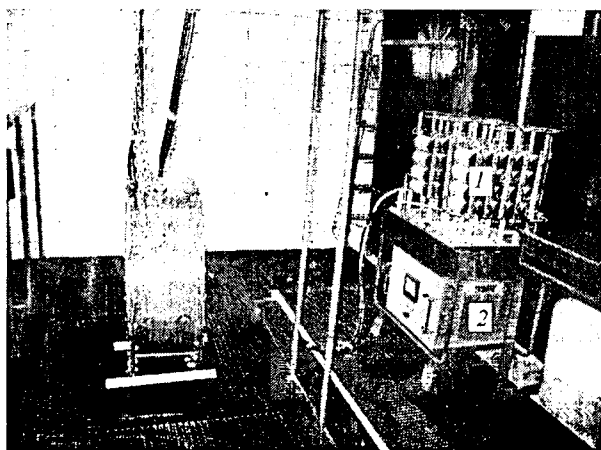


Рис. 4. Внешний вид установки ЭГУ ($U=100$ кВ; $W_c=1,25$ кДж): 1 – конденсаторы; 2 – зарядное устройство

Список статей, опубликованных в журнале «Электротехника» в 2008 г.

Годжелло А.Г., Дегтярь В.Г., Маслов С.И., Москаленко В.В., Филиков В.А. Новые аспекты подготовки специалистов электротехнического профиля	3	60	Ворошилов В.С., Голембиовский М.И., Жиров В.В., Мартынов О.В., Пискунов С.В. Асинхронные двигатели для оборудования АЭС	11	60
К 75-летию кафедры «Теоретические основы электротехники» Самарского государственного технического университета	8	2	Гловацкий А.В., Кубарев Л.П., Макаров Л.Н. Основные направления развития электрических машин и электромеханических систем на их основе	4	2
Кругликов О.В., Макаров Л.Н. Состояние и перспективы разработок и производства новых электродвигателей специалистами ОАО «НИПТИЭМ» и ОАО «ВЭМЗ»	11	2	Гусельников А.Э., Баклин В.С., Баранов П.Р. Рольганговые частотно-регулируемые асинхронные двигатели	5	19
Троицкая Т.Б. Российская электротехнологическая компания ЗАО «РЭЛТЕК»	2	62	Драгомиров М.С., Зайцев А.М., Кругликов О.В. Расчёт вентиляции обдуваемых электрических машин с помощью численного трёхмерного моделирования течения воздушного потока	4	12
Электрические машины			Зайцев А.М., Захаров А.В., Кобелев А.С., Кругликов О.В. Новая серия частотно-регулируемых асинхронных двигателей общего применения разработки ОАО «НИПТИЭМ»	9	2
Авилов В.Д., Попов Д.И. Коммутация в машинах постоянного тока с катящимся токосъёмом	7	18	Захаренко А.Б., Дульцев А.А. Исследование теплового режима специального магнитоэлектрического двигателя	3	31
Андреианов М.В., Кругликов О.В., Родионов Р.В. Разработка и внедрение системы управления напряжением синхронных генераторов	7	10	Захаров А.В., Колосов А.Л. Исследование эффективности применения специальных серий частотно-регулируемых асинхронных двигателей в электроприводах центробежных насосов	11	49
Андреианов М.В., Родионов Р.В. Методы оценки энергоэффективности современных низковольтных асинхронных двигателей	11	24	Кобелев А.С., Кудряшов С.В. Математическая модель электромагнитного расчёта асинхронных электродвигателей для работы с алгоритмами оптимизации	11	28
Афонин В.И. Предварительный выбор двигателей для привода редукторных лебёдок лифтов	11	53	Кобелев А.С., Макаров Л.Н., Русаковский А.М. Концепция разработки электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей энергоэффективных серий	11	11
Белассел Моханд-Тахар, Беспалов В.Я. Волновые параметры и межвитковые перенапряжения в многовитковой вольтовой обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя	7	14	Корчагин Н.В., Степанов А.И., Богуславский И.З., Вейнгер А.М., Рябова Т.С., Цацкин А.Я. Проблемы создания мощных четырёхполюсных асинхронных двигателей	4	16
Богуславский И.З., Кришнянис М.В. Метод расчёта поверхностного эффекта в стержне клетки ротора с учётом изменения в нём температуры при пуске	3	24	Костырев М.Л., Джендубаев А.З.Р. Электрическая мощность серийного асинхронного двигателя при его использовании в качестве асинхронного генератора	7	6
Большаков Д.В., Рябов В.Н., Цацкин А.Я. Новая серия двухполюсных асинхронных двигателей типа АЗМ и АРМ мощностью 1250 – 8000 кВт, производства ПО «Ленинградский Электромашиностроительный завод»	4	56	Котенёв В.В., Котенёв В.И. Математическая модель диска газотурбинного двигателя при управлении термощиклическими нагрузениями на стенде	8	62
Вершинин А.В., Драгомиров М.С., Зайцев А.М., Кругликов О.В. Разработка специальных конструктивных исполнений частотно-регулируемых асинхронных электродвигателей	11	46	Кочергин В.В. К расчёту индуктивности однозубцовой обмотки	9	61
Винокуров В.А., Горелов А.Т., Сохор Ю.А. Применение тензорной декомпозиции для исследования модульных линейных асинхронных двигателей	5	9	Кудряшов С.В. Способ расчёта потерь в стали индукторного двигателя	4	29
Воронцов А.Г., Доан Ань Туан, Коськин Ю.П., Пронин М.В. Высокочастотные электромагнитные процессы в электрических машинах при широтно-импульсной модуляции напряжения	3	36	Лопатин В.В., Цацкин А.Я., Горелик Л.В., Гулка Р.В. Особенности проектирования подшипниковых узлов крупных электрических машин	4	51
			Лошкарёв В.П. Особенности модернизации гидрогенераторов Чиркейской ГЭС (4×250 МВт)	4	53

Лошкарёв В.П., Эльберг Е.С. Особенности конструкции гидрогенераторов-двигателей для Загорской ГАЭС	4	25	рование электромеханических тормозных устройств для станкостроения и робототехники	5	48
Малафеев С.И., Захаров А.В. Исследование потерь в асинхронном двигателе с частотным регулированием при переходных процессах	7	2	Брадаи Р., Шетат Б., Ладыгин А.Н. Повышения эффективности регулятора скорости частотно-регулируемого асинхронного электропривода средствами искусственного интеллекта	12	41
Мартынов О.В., Пискунов С.В., Русаковский А.М. Асинхронные взрывозащищённые электродвигатели серии ВА	11	58	Вейнгер А.М., Медведев В.Н. Векторный показатель искажения напряжений и токов в трёхфазной системе	9	33
Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г. Моделирование динамических и статических режимов работы ветроэлектрической установки с асинхронной машиной двойного питания	9	11	Волков А.В., Скалько Ю.С. Оптимальное по минимуму общих потерь мощности управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом с АИН-ШИМ	9	21
Пискунов С.В., Ефремов А.П. Электродвигатели для привода вспомогательных механизмов современных локомотивов	11	63	Захаров А.В. Возможности применения прикладных программ моделирования и анализа переходных процессов в инженерных задачах проектирования асинхронного электропривода	4	8
Попов В.И. Гармонический анализ МДС трёхфазных дробных симметричных обмоток электрических машин	5	2	Земан С.К., Осипов А.В., Сахаров М.С. Исследование цифровых систем фазовой автоматической подстройки частоты последовательного резонансного инвертора	1	28
Рассказов Ф.Н., Голубовский А.В., Мигачёва Л.А., Шварц Г.Р. Определение областей динамической устойчивости синхронного двигателя газоперекачивающего агрегата при различных законах регулирования возбуждения	8	38	Кириенко В.П. Системы импульсного электропитания частотно-регулируемых озонаторов	1	21
Русаков А.М., Сафроненков Ю.А., Жердев И.А., Соломин А.Н. Перспективы применения индукторных машин с обмоткой возбуждения	4	38	Кудин В.Ф., Киселичник О.И. Квазиоптимальная децентрализованная астатическая система автоматического управления скоростью асинхронного двигателя на основе метода векторных функций Ляпунова	1	9
Чернышёв В.А., Сафроненков Ю.А., Гордиловский А.А., Чернов В.А. Современные подходы к оценке состояния изоляции электрических машин высокого напряжения	4	22	Курган В.П., Кузнецов П.К., Панкин А.А. К задаче оптимизации контура регулирования скорости в электроприводах постоянного тока	8	43
Чучман Ю.И., Черепаняк М.В., Максимович Д.С. Структурная и параметрическая оптимизация неперекрещивающихся обмоток исполнительных и измерительных электрических машин	3	17	Махмуд Бассам, Сафонов Ю.М. Формирование траектории движения промышленного робота на базе искусственной нейронной сети	7	57
Шабаев В.А. Анализ критериев технико-экономического оптимума применения вентильно-индукторных двигателей	4	44	Мищенко В.А. Фазовый принцип векторного управления динамикой асинхронного электропривода	1	2
Шабаев В.А., Кругликов О.В. Особенности управления двухфазными и однофазными нереверсивными вентильно-индукторными двигателями	11	35	Смирнов Ю.В. Электромагнитные вентильно-индукторные электроприводы с разомкнутой системой управления	1	18
Шабаев В.А., Кругликов О.В. Исследования двухфазного нереверсивного вентильно-индукторного двигателя	11	41			
Шмелёв В.Е., Сбитнев С.А. Пространственно-фазовое 2D моделирование электромеханического преобразования в электрических машинах	9	16	Силовая электроника. Преобразовательная техника		
Янгиров И.Ф. Вибрационный электродвигатель со спиральным вторичным элементом	5	14	Андреанов М.В., Афонин В.И., Родионов Р.В. Выбор преобразователя частоты для применения в электроприводе, работающем с постоянным моментом	5	42
			Баховцев И.А. Использование трёхфазного АИН с ШИМ для управления асинхронным исполнительным двигателем	6	45
Электропривод			Белов Г.А., Лукиян Д.С. Устойчивость импульсного преобразователя с двусторонней ШИМ-2	6	59
Альшиц В.М., Бажин Б.Г., Зеленцов В.И. Регулируемый электропривод переменного тока машины нового типа для непрерывного литья заготовок	1	36	Бородин Н.И. Синтез оптимальной структуры системы регулирования при параллельной работе статических стабилизированных источников переменного тока на общую нагрузку	6	20
Бочкарёв И.В., Гунина М.Г., Галбаев Ж.Т. Разработка и компьютерное модели-					

Брованов С.В. Особенности электромагнитных процессов в трёхфазном трёхуровневом выпрямителе	6	39			
Брованов С.В., Харитонов С.А. Реализация векторной ШИМ в трёхфазном трёхуровневом выпрямителе	6	33			
Бродский Ю.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе ёмкостных накопителей энергии	7	38		6 27	
Виноградов А.Б., Сибирцев А.Н., Колодин И.Ю. Температурная защита преобразователя частоты на основе динамической тепловой модели IGBT-модуля	6	8		10 22	
Волков А.В., Косенко И.А. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока на запираемых тиристорах с прогнозирующим релейно-векторным регулированием статорного тока	10	6		10 28	
Гальперин В.Е., Колесник Д.А. Защита оборудования от электромагнитных помех в сетях электроснабжения	10	40		12 13	
Гуслин Ю.П. Коммутации тиристоров в схемах релейно-импульсного регулирования переменного напряжения	7	22		9 39	
Еньков С.В., Кочкин В.И., Крайнов С.В., Кошелев К.С., Пешков М.В. Оценочный и точный расчёт вентиляционной части преобразователя напряжения при проектировании	10	2		7 28	
Земан С.К., Осипов А.В., Сахаров М.С. Исследование влияния параметров управляющего воздействия на характеристики системы фазовой автоматической подстройки частоты последовательного резонансного инвертора	10	57		6 3	
Иванов А.Г., Донской Н.В., Матисон В.А., Ушаков И.И. Высоковольтные автотрансформаторные преобразователи частоты для электроприводов	10	18			
Иванов С.Н., Ким К.К., Карпова И.М. Теплогенерирующий электромеханический преобразователь	9	46		8 57	
Ивакин В.Н., Магницкий А.А. Устройства продольной компенсации на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах	10	47		8 53	
Кошелев К.С., Пешков М.В. Выбор параметров статического компенсатора реактивной мощности типа СТАТКОМ	7	34			
Лучин А.В., Лычагов С.А., Мартышин Ю.В. Распределение активных нагрузок в системе автономного электроснабжения с перестраиваемой структурой первичных источников электрической энергии	10	63		3 11	
Розанов Ю.К., Льюнг Т.Ф. Компенсация реактивной и искажающей мощностей в судовых и корабельных электроэнергетических системах	10	36		3 2	
Розанов Ю.К., Мамедов Т.Т. Регуляторы яркости с улучшенными энергетическими характеристиками для питания аэродромного светосигнального оборудования	6	52		8 5	
			Харитонов С.А., Коробков Д.В., Маслов М.А., Бородин Н.И., Левин А.В., Юхнин М.М., Лившиц Э.Я. Система генерирования электрической энергии типа «переменная скорость — постоянная частота» на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения	6	27
			Черевко А.И., Музыка М.М., Лимонникова Е.В. Влияние силовых схем коммутаторов на качество выходного напряжения управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями	10	22
			Черевко А.И., Музыка М.М. Исследование влияния управляемых выпрямителей с трансформаторами вращающегося магнитного поля на питающую сеть	10	28
			Черевко А.И., Музыка М.М. Исследование качества выходного напряжения и тока и энергетических соотношений автономных инверторов с трансформаторами вращающегося магнитного поля	12	13
			Шавёлкин А.А. Анализ возможностей реализации несимметричных каскадных многоуровневых преобразователей частоты	9	39
			Шевлюгин М.В. Энергосберегающие схемы тягового электроснабжения железных дорог на базе сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии	7	28
			Шутце Т., Бирманн Дж., Шпанек Р., Пфафенленер М. Технологии 3,3 кВ IGBT-модулей: в каком направлении развиваться и чего можно достичь?	6	3
			Устройства управления, распределения электрической энергии и защиты		
			Абакумов А.М., Мятлов Г.Н., Винокуров А.А. Электромеханические системы виброзащиты прецизионных объектов с использованием нейронных сетей	8	57
			Бирюков А.Н., Степанов В.П. Моделирование корреляционной функции и оценка дисперсии группы периодически работающих зависимых электроприёмников	8	53
			Богаченко Д.Д., Овчаренко Н.И., Шитов Р.В. Быстродействующее измерительное преобразование промышленной частоты для автоматики электроэнергетических систем	3	11
			Волков А.В., Волков В.А. Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением	3	2
			Высоцкий В.Е., Назаренко Д.С., Привалов В.Д., Гуртов А.С. Моделирующий комплекс для исследования автономных систем электропитания	8	5
			Высоцкий В.Е., Назаренко Д.С., Привалов В.Д., Филатов А.Н. Средства и методы контроля импедансных характеристик автономных систем электропитания	8	21

Гольдштейн В.Г., Гуляев В.А., Косолюков И.А., Степанов В.П. Погрешности измерений при технической диагностике электроустановок	8	47		
Карасев А.В., Пустыльняк И.А. Аппаратно-программный комплекс тестирования цифровых систем управления	3	14		
Кирюхин А.Ю., Буре И.Г. Гибридный фильтр высших гармоник для трёхфазных сетей переменного тока 0,4 кВ	5	37		
Корнилов Г.П., Николаев А.А., Коваленко А.Ю., Кузнецов Е.А. Средства и перспективы управления реактивной мощностью крупного металлургического предприятия	5	25		
Манусов В.З., Михеев П.А. Математическая модель электромагнитного переходного процесса в электрической сети, содержащей сверхпроводниковый токоограничитель индуктивного типа	7	50		
Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф., Лукин Э.И. Особенности подключения рефлектометра к линиям электропередачи при локационном зондировании	2	34		
Минуллин Р.Г., Петрушенко Ю.Я., Фардиев И.Ш. Зондирование воздушных линий электропередачи локационным методом	7	42		
Минуллин Р.Г., Петрушенко Ю.Я., Фардиев И.Ш., Лукин Э.И., Лукина Г.В. Обнаружение локационным методом однофазных замыканий проводов линий электропередачи на землю	12	20		
Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В. Координация работы устройств FACTS в магистральных сетях на основе методов нечёткой логики	1	57		
Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В. Оптимальные регуляторы на основе устройств FACTS для децентрализованного управления крупными ОЭС	2	55		
Овчаренко Н.И., Шитов Р.В. Метод быстродействующего определения амплитуды принуждённой составляющей тока короткого замыкания	5	32		
Трансформаторы. Реакторы				
Долгополов А.Г. Релейная защита и автоматика линейного управляемого шунтирующего реактора 500 кВ	2	19		
Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование многообмоточных трансформаторов в фазных координатах	5	56		
Логинов В.С., Юхнов В.Е. Нестационарные температурные режимы обмоток трансформаторов-бетатронов с ограниченным числом повторений нагрева-охлаждения	2	30		
Лурье А.И. Процесс включения трансформатора на холостой ход и короткое замыкание	2	2		
Тимофеев И.А., Кустов Е.Ф. К разработке магнитопровода для трансформатора малой мощности на основе безотходной технологии	2	25		
Электрические аппараты				
Абдуллаев Я.Р. Оптимизация левитационного экрана электромеханического преобразователя усилителей	12	51		
Щербаков Г.Н., Шлыков Ю.А., Бровин А.В., Усманов Р.И. Энергетические соотношения при использовании эффекта электрогидравлического удара в борьбе с подводным терроризмом	12	59		
Аппараты высокого напряжения				
Бортник И.М., Волкова О.В., Корявин А.Р. Перспективы создания нового поколения оборудования высокого, сверх- и ультравысокого напряжения с естественным уровнем изоляции	9	57		
Лаврентьев Г.Г., Минакова Л.В., Попов Д.К. Устройство диагностического контроля ограничителей напряжения	9	52		
Аппараты низкого напряжения				
Воронин А.А., Киреев К.В., Кулаков П.А., Приходченко В.И. Опыт использования жидкометаллического рабочего тела в силовых коммутационных аппаратах и контактных соединениях	8	10		
Мешеряков В.П., Сибатов Р.Т., Самойлов В.В., Топчий А.С. Расчёт тока дуги отключения и времени её гашения в низковольтных выключателях	2	43		
Шоффа В.Н., Чичерюкин В.Н. Влияние поляризации на характеристики реле с переключающими герконами	4	58		
Исследования и расчёты				
Аракелян В.Г. Исследование теплового старения изоляционных жидкостей. Ч.2. Расчёт и практическое использование кинетических параметров процесса старения	1	41		
Аракелян В.Г. Практическая физико-химическая диагностика МНО в простейшей системе мониторинга	12	29		
Бенисович И.С., Тимошенко К.П., Кичаев В.В., Юрганов А.А. Диагностический наладочный комплекс "Диана"	4	33		
Желтов В.В. Аналитический расчёт электротехнических характеристик прямолинейных сверхпроводников: смешанное возбуждение при преобладающем воздействии источника питания	3	51		
Измайлов В.В., Новосёлова М.В., Наумов А.Е. Применение статистических методов для прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений	1	51		
Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Статические и динамические характеристики электромагнитного подвеса	8	25		
Петров А.Е. Тензорный метод и двойственные сети в электротехнике	12	2		

Придубков П.Я. О влиянии параметров массивного ферромагнитного тела на характеристики его магнитного поля	7	62	Яковлев В.Ф., Синицин А.П. Анализ работы зарядных блоков суперконденсаторных пусковых устройств двигателей легковых автомобилей	8	14
Размыслов В.А., Кузьмин В.М., Сериков А.В. Расчёт тормозного усилия электродинамического замедлителя вагонов	5	61			
Рябихин Е.А. Исследование чувствительности передаточных функций электромеханических систем к отклонению параметров в динамическом режиме	8	18	Научные гипотезы		
Сандомирский С.Г. Анализ формул для расчёта центрального коэффициента размагничивания полых цилиндров из материала с высокой магнитной проницаемостью при намагничивании ортогонально образующей	3	45	Копылов И.П. Обобщённая электрическая машина и обобщённый электро-механический преобразователь	2	50
			Из опыта работы		
Электротермия			Зекцер Д.М.О замене низковольтных электрических аппаратов	5	64
Базаров А.А., Данилушкин А.И., Латыпов Р.Р. Расчёт индукторов для систем индукционного нагрева дисков и формирования механических колебаний в процессе испытаний	8	34	Хроника		
Зимин Л.С., Базир Н.А. Автоматизация электротермического производства	8	30	Академия электротехнических наук Российской Федерации	1	62
Салтыков А.В. Автокорреляционные функции тока дуговой сталеплавильной печи на технологических этапах	8	50	Наши юбиляры		
			Богуславский Илья Зеликович	1	64
Конденсаторы силовые			Дацковский Лев Ханинович	3	65
Гулько В.И., Онищенко Л.И., Гребенников И.Ю., Дмитришин А.Я., Топоров С.О. Исследование влияния повышенных температур и давления на электрическую прочность полиметилсилоксановой жидкости ПМС-20 и касторового масла, насыщенных элегазом	7	59	Ковчин Сергей Александрович	3	64
			Лазарев Григорий Бенционович	6	65
			Лурье Александр Иосифович	8	65
			Макаров Лев Николаевич	9	65
			Чибиркин Владимир Васильевич	11	66
			Шакарян Юрий Гевондович	12	3 с. обл.
			Шамов Александр Николаевич	12	63
			Юньков Михаил Григорьевич	1	65
			Правила оформления статей, направляемых в журнал «Электротехника»	3	63

Александр Николаевич Шамов

(к 90-летию со дня рождения)

Александр Николаевич Шамов родился 6 декабря 1918 г. в деревне Яковлево Кологривского района Костромской области. В 1936 г. закончил школу и поступил в Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина) на радиотехнический факультет. В 1939 г. в числе семи студентов выбрал новую специальность по программе профессора В.П. Вологодина – применение токов высокой частоты в промышленности. В июне 1941 г., окончив пятый курс, А.Н. Шамов ушёл добровольцем на ленинградский фронт.

В конце ноября 1941 г. по инициативе В.П. Вологодина он был отозван с фронта для окончания образования и работы в Лаборатории высокочастотных технологий. В феврале 1942 г. вместе с группой соратников и учеников В.П. Вологодина был эвакуирован в г. Челябинск для работы в КБ танков генерала Ж.Я. Котина.

В 1944 г. Александр Николаевич вернулся в Ленинград и по заданию В.П. Вологодина создавал и внедрял процесс закалки автомобильных деталей на Московском заводе малолитражных автомобилей, внедрял токи высокой частоты на 1-м Государственном подшипниковом заводе.

В апреле 1947 г. А.Н. Шамов был переведен из Лаборатории В.П. Вологодина в ЛЭТИ во вновь созданный Научно-исследовательский институт по промышленному применению токов высокой частоты (НИИТВЧ) и сразу же назначен начальником отдела внедрения.

Александр Николаевич около 20 лет возглавлял важнейший отдел института и много сделал для



внедрения в промышленность Советского Союза и стран – членов СЭВ передовых высокочастотных электротехнологий.

Неоценим его личный вклад в создание и внедрение индукционного оборудования при строительстве новых прокатных станов, кузнечных цехов, создание и внедрение процессов и оборудования для индукционной поверхностной закалки машиностроительных деталей, термообработки сортового проката и др. К 1986 г. общая мощность высокочастотного оборудования, которое запустил на заводах отдел внедрения под руководством А.Н. Шамова, была более 2 млн. кВт.

На посту заместителя директора ВНИИТВЧ по научной работе более 20 лет Александр Николае-

вич активно работал над формированием новых направлений применения токов высокой частоты – высокочастотной сварки металлов и диэлектрических материалов, полупроводниковой металлургии, плазменных технологий, ультразвуковых процессов. Много сил отдал Александр Николаевич повышению роли института как научного центра страны по высокочастотной электротермии и ультразвуку. Под научным руководством А.Н. Шамова ВНИИТВЧ вёл 22 работы по целевой Программе ГКНТ СССР.

Александр Николаевич был главным редактором 5 изданий «Библиотечки высокочастотника-термиста» которые сыграли большую роль в популяризации новых разработок ВНИИТВЧ для промышленности. Результаты своих работ Александр Николаевич обобщил в более чем 120 печатных работах и изобретениях, в диссертационной работе на соискание учёной степени кандидата технических наук, которую защитил в 1962 г.

Многие из работ Александра Николаевича были настоящими настольными книгами инженеров и исследователей нескольких поколений института и заводов.

Труд А.Н. Шамова высоко оценён – он лауреат Государственной премии, кавалер орденов Отечественной войны и Трудового Красного Знамени и др.

И сегодня, несмотря на возраст, Александр Николаевич не теряет связь с институтом. Его отличает высокая жизненная позиция, активность и заинтересованность во всех делах института, стремление усилить роль научно-технического Совета в решении этих дел.

Коллектив ВНИИТВЧ и редколлегия журнала «Электротехника» сердечно поздравляют Александра Николаевича с 90-летием, желают здоровья, хорошего настроения, успехов.

Юрий Гевондович Шакарян

(к 75-летию со дня рождения)

Исполнилось 75 лет известному учёному в области электротехники и электроэнергетики Заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору Юрию Гевондовичу Шакаряну. За 52 года работы в электроэнергетике Юрий Гевондович прошёл большой путь от инженера Всесоюзного научно-исследовательского института электроэнергетики (ВНИИЭ) до заместителя генерального директора — научного руководителя ОАО «Научно-технический центр электроэнергетики» и внёс значительный вклад в развитие отечественной науки и техники.

Более 30 лет назад Ю.Г. Шакарян создал принципиально новое научное направление по разработке теоретических и инженерных основ конструирования электромашино-вентильных систем, основанных на синтезе специальных электрических машин и устройств силовой электроники, разработаны алгоритмы и методы управления такими системами. Трудно переоценить для электроэнергетики значение работ Ю.Г. Шакаряна, обеспечивших создание и освоение производства не имеющих аналогов в мировой практике новых типов электрических машин — асинхронизированных генераторов. Под его научным руководством впервые были разработаны и введены в эксплуатацию на Иовской ГЭС асинхронизированные гидрогенераторы мощностью 40 МВт (1963–1972 гг.). Для Кисло-губской приливной электростанции был разработан оригинальный асинхронизированный генератор-двигатель, введённый в эксплуатацию в 1977 г. В 1985 г. были разработаны и внедрены на Бурштынской ГРЭС асинхронизированные турбогенераторы мощностью 200 МВт с водородно-водяным охлаждением, исследования которых в эксплуатационных режимах работы позволили разрабо-



тать асинхронизированные турбогенераторы нового поколения с микропроцессорной системой автоматического регулирования возбуждения.

В последние годы под руководством и при личном участии Ю.Г. Шакаряна в рамках Программы внедрения асинхронизированных турбогенераторов нового поколения до 2015 г. на ТЭС страны вводятся асинхронизированные турбогенераторы с воздушным охлаждением мощностью 110–320 МВт.

О разносторонности научных идей Ю.Г. Шакаряна свидетельствует выполненный под его руководством большой комплекс исследований и практических разработок по созданию и внедрению в электроэнергетику новых энерго- и ресурсосберегающих технологий на основе регулируемых по скорости электроприводов механизмов собственных нужд ТЭС. В 1988–1990 гг. были разработаны совместно с австрийской фирмой «ЭЛИН» и внедрены на тягодутье-

вых механизмах ряда ТЭС регулируемые электроприводы нового типа — на базе бесконтактной машины двойного питания.

В последние 5 лет Ю.Г. Шакарян возглавляет новое направление инновационно-технологического развития Единой энергетической системы России: исследование и создание управляемых (гибких) линий переменного тока (FACTS), обеспечивающих повышение пропускной способности электропередач и управление потоками мощности по линиям, создание сверхпроводниковых кабельных линий на основе высокотемпературных сверхпроводников.

Автор 300 научных трудов, в том числе 10 монографий, действительный член академии электротехнических наук РФ и Международной энергетической академии, создатель научной школы Ю.Г. Шакарян пользуется заслуженным авторитетом, признанием и уважением коллег и учеников. Под его научным руководством защищено 20 кандидатских и 5 докторских диссертаций.

За цикл работ «Теория, проектирование и моделирование управляемых машинно-вентильных систем» Ю.Г. Шакаряну в 1995 г. была присуждена престижная премия им. П.Н. Яблочкова Российской академии наук.

В течение многих лет Ю.Г. Шакарян ведет активную научно-общественную деятельность. Он возглавляет диссертационный совет по защите докторских диссертаций, научно-технический совет ОАО «НТЦ электроэнергетики», является членом редколлегии журнала «Электричество».

За вклад в развитие электроэнергетики страны Ю.Г. Шакарян награжден орденом Трудового Красного Знамени, медалью «В память 850-летия Москвы», в 1998 г. удостоен звания «Почётный энергетик».

Друзья, ученики, коллеги сердечно поздравляют Юрия Гевондовича с юбилеем и желают здоровья, благополучия и активного творческого долголетия

Правила оформления статей, направляемых в журнал «Электротехника»

1. Объем статьи не должен превышать 12 страниц текста, отпечатанного на машинке или набранного на компьютере через 2 интервала с полями 2–3 см, и иметь не более 5 рисунков.

2. В статье должны быть: введение, сформулирована постановка задачи, изложено содержание работы, показана достоверность результатов, приведены выводы, рекомендации и эффективность.

3. К статье должна быть приложена аннотация (2–3 предложения) и ключевые слова на русском и английском языках. Название статьи также следует дать на русском и английском языках.

4. Статья должна сопровождаться письмом автора или организации (если она упоминается) и сведениями об авторах. Необходимо привести фамилии, имена и отчества всех авторов полностью, домашние адреса с почтовыми индексами, номера домашнего и служебного телефонов, место работы, ученое звание и степень, какой факультет, какого вуза и когда закончен, тему диссертации и год ее защиты. Можно приложить фотографии авторов.

Желательно, чтобы число авторов не превышало пяти. Фамилии лиц, принимавших участие в работе, можно дать в сноске.

5. Формулы должны быть набраны на компьютере (крупно) в отдельные строчки (а не в текст).

6. Таблицы не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблице, на рисунках и в тексте статьи должны быть в единицах измерения СИ.

7. Чертежи, графики, диаграммы и т.д. должны быть выполнены четко. Возможно изготовление рисунков с помощью компьютера. Условные обозначения на самом рисунке должны быть предельно краткими и общеупотребительными. Расшифровка условных обозначений и подписи к рисункам (не громоздкие) даются на отдельном листе.

Фотографии к статье (в двух экземплярах) должны быть отпечатаны на белой матовой бумаге (размером не менее 9×12 см), изображение должно быть контрастным, с хорошо проработанными деталями. Если фотографии присылаются на дискетах, то разрешение должно быть не менее 300 пикселей на дюйм и размеры фотографии не очень велики. Все обозначения ставятся на отдельном экземпляре.

8. Список литературы приводится в конце статьи, в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

Для книг должны быть указаны: фамилия и инициалы всех авторов, название книг, город, издательство, год выпуска. Для журнальной статьи: фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том), страницы. Для сборников и продолжающихся изданий: фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск, страницы.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы для служебного пользования, а также малораспространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим способом, и т.д.

9. Статью в двух экземплярах следует высылать в редакцию простой или заказной бандеролью (приложить дискету с набранным текстом), либо по E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru