

ISSN 0013-5860





ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издается с января 1930 года

УЧРЕДИТЕЛИ

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)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

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

Содержание журнала можно бесплатно получить в INTERNET через службу ИНФОМАГ, организованную в Московском физико-техническом институте.

Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>

Журнал переводится на английский язык в полном объеме 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 объединенному 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 несет.

Рукописи статей не возвращаются.

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

Адрес редакции: 123242, Москва, Зоологическая ул., 11, комн. 213 Телефон/факс: 254-11-52

E-mail elektrotehnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина.

Научный редактор Л.А. Романова.

Редактор Т.В. Штанько.

Сдано в набор 02.06.2003. Подписано в печать 14.07.2003. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 94

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

© «Электротехника», 2003 г.

№ 8 АВГУСТ 2003

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Караваев В.Т., Запольских С.Н., Данецкий А.Н.	
Импульсный трансформатор с магнитным сопротивлением (ИМС)	2
Попов Г.В., Ватлецов А.В., Аль-Хамри С.С.	
Экспертная поддержка при диагностике состояния силовых трансформаторов	5
Иванченко О.Н., Эндик В.А.	
К расчету перехода магнитного потока через границу двух сред с учетом анизотропии среды	12

ИССЛЕДОВАНИЯ

Свентицкий И.И.	
Закон электромагнитной инерции Ленца и феноменальные принципы физики	16
Алимходжаев К.Т.	
Взаимное влияние электромагнитных и механических переходных процессов в асинхронных вибродвигателях	20
Власов А.Б.	
Определение гамма-процентного ресурса контактных соединений по данным тепловизионной диагностики	25
Якимец И.В., Шевцов М.В.	
Определение эквивалентных параметров энергосистемы в процессе её динамического перехода	29
Григорьев А.В., Семёнов Д.Ю., Осотов В.Н., Ямпольский Д.А.	
Исследование вибромеханических характеристик пакета электротехнической стали и возможности их использования для контроля прессовки сердечника статора турбогенератора	36

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Сивков А.А., Корольков Л.В., Сайгаш А.С.	
Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя	41

АККУМУЛЯТОРЫ

Скачков Ю.В., Колосовский В.В., Белоусов О.А.	
Пути повышения напряжения топливных элементов	46
Баюнов В.В., Барсукова М.М., Подалинский Ю.А., Коликова Г.А.	
Влияние температуры на поляризационное сопротивление герметизированных свинцовых аккумуляторов	50
Кривченко Г.В., Юдилевич С.Р., Коликова Г.А.	
Влияние некоторых органических расширителей на характеристики отрицательного электрода свинцового аккумулятора	53

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Дизендорф Э.А.	
Новый тип резонансного инвертора	57
В академии электротехнических наук РФ	
.....	61

CONTENTS

TRANSFORMERS

Karavaev V.T., Zapolskikh S.N., Danetskiy A.N.	
Impulse transformer with magnetic resistance (IMR)	2
Popov G.V., Vatletsov A.V., Al-Hamri S.S.	
Expert support in diagnostics of power transformers condition	5
Ivanchenko O.N., Endik V.A.	
To the calculation of magnetic flow transition through the boundary between two substances concerning substance anisotropy	12

RESEARCH

Sventitskiy I.I.	
Electromagnetic inertia Lenc's law and phenomenal physics principles	16
Alimhodjaev K.T.	
Mutual influence of electromagnetic and mechanical transient processes in asynchronous vibromotors	20
Vlasov A.B.	
Estimation of contacts gamma-percentage life time using thermal imaging diagnostics data	25
Yakimets I.V., Shevtsov M.V.	
Equivalent power system parameters determination during its dynamic transitions	29
Grigoriev A.V., Semenov D.Y., Osotov V.N., Yampolskiy D.A.	
Research of electrical steel laminal elastic and absorbent properties dependence on pressing pressure	36

ELECTROTECHNICS

Sivkov A.A., Korolkov L.V., Saigash A.S.	
Copper coating of aluminium contact surfaces using magnetoplasma accelerator	41

POWER CELLS

Skachkov Y.V., Kolosovskiy V.V., Belousov O.A.	
Ways of fuel cells voltage improvement	46
Bayunov V.V., Barsukova M.M., Podalinskiy Y.A., Kolikova G.A.	
Temperature influence on polarization resistance of sealed lead cells	50

Krivchenko G.V., Yudilevich S.R., Kolikova G.A.	
Influence of some organic expander on characteristics of lead cell negative electrode	53

CONVERTED ENGINEERING

Dizendorf E.A.	
New type of resonance inverter	57
At Academy electrical engineering sciences	
.....	61

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Импульсный трансформатор с магнитным сопротивлением (ИМС)

КАРАВАЕВ В.Т., доктор техн. наук, проф. (Вятский ГУ),
ЗАПОЛЬСКИХ С.Н. (АООТ "Кирово-Чепецкий химический комбинат им. В.П. Константина"),
ДАНЕЦКИЙ А.Н. (АО "Кировэнерго"), инженеры

Приведены анализ и методика расчета импульсного трансформатора с магнитным сопротивлением, в котором передача энергии от источника питания нагрузке осуществляется через магнитную подсистему, что позволяет улучшить его энергетические показатели и получить новые свойства. Рассмотрено влияние электропроводящих элементов, позволяющих дополнительно улучшить энергетические показатели.

В прикладной физике и электротехнике сформировалось новое направление, получившее название физики и электротехники импульсных систем [1]. Одна из актуальных задач этого направления – получение электрических импульсов, энергия, мощность и напряжение которых измеряются мегаджоулями, тераваттами и мегавольтами. В импульсных системах импульсный трансформатор выступает как объект импульсной энергетики и техники высоких напряжений, поэтому к нему должны предъявляться также и разнообразные технико-экономические требования.

Трансформаторы применяются в устройствах проверки и наладки автоматических выключателей [2]. Для этих целей могут использоваться импульсные трансформаторы, в которых энергия импульса может быть повышена введением в трансформатор магнитной подсистемы в виде немагнитного зазора. В этом случае источник питания может отдавать трансформатору значительно больше энергии, значение которой определяется, в основном, параметрами магнитной подсистемы. Энергия дополнительно может быть повышена с помощью электропроводящих элементов, обеспечивающих "сжатие" магнитного потока и увеличивающих, таким образом, энергию магнитного поля.

Как известно, для равномерного магнитного поля магнитная энергия определяется формулами

$$W_m = \frac{BH}{2}V = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}V = \frac{\Phi^2 R_{m\delta}}{2}, \quad (1)$$

где B , H – индукция и напряжённость магнитного поля; Φ – магнитный поток; $R_{m\delta}$ – магнитное сопротивление; V – объём, занимаемый магнитным полем; μ – относительная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная постоянная.

В трансформаторе с ненасыщенным магнитным сердечником и без немагнитного зазора относительная магнитная проницаемость велика, порядка нескольких тысяч, и поэтому согласно (1) магнитная энергия в нём незначительна. Магнитная энергия главным образом сосредоточена в немагнитном зазоре или в насыщенном магнитном сердечнике, где магнитная проницаемость близка к единице.

Таким образом, в ИМС трансформаторе процесс передачи энергии нагрузке осуществляется через накопление энергии в магнитной подсистеме. В качестве накопителя магнитной энергии используется немагнитный зазор или магнитный материал магнитопровода трансформатора в области насыщения.

Рассмотрим цикл работы такого трансформатора (рис.1). В момент времени $t = 0$ к первичной обмотке подключается источник питания, в результате этого в магнитной подсистеме происходит накопление магнитной энергии (рис.1, а). Когда накопится достаточное количе-

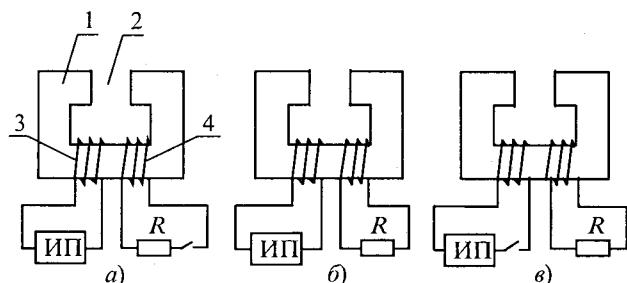


Рис.1. Цикл работы ИМС трансформатора:

а – передача энергии от источника питания магнитной подсистеме; б – подключение нагрузки; в – передача энергии от магнитной подсистемы нагрузке; 1 – магнитопровод; 2 – немагнитный зазор; 3 – первичная обмотка; 4 – вторичная обмотка; ИП – источник питания; R – нагрузка

ство энергии, вначале подключается нагрузка к вторичной обмотке (рис.1,б), а затем сразу же (через время много меньше длительности выходного импульса) источник питания отключается от первичной обмотки (рис.1,в) и вся накопленная энергия в магнитной подсистеме передаётся нагрузке в виде короткого, мощного импульса.

Уравнение электрической цепи первичной обмотки, при пренебрежении активным сопротивлением обмотки, запишется так:

$$U_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

где U_1 – напряжение источника питания; w_1 – число витков первичной обмотки.

Из (2) магнитный поток

$$\Phi = \frac{1}{w_1} \int_0^t U_1 dt. \quad (3)$$

Для источника напряжения с прямоугольной формой импульса

$$U_1 = \begin{cases} U_0, & \text{если } 0 \leq t \leq t_{p1}; \\ 0, & \text{если } t < 0; \quad t > t_{p1} \end{cases}$$

магнитный поток

$$\Phi = \begin{cases} \frac{U_0 t}{w_1}, & \text{если } 0 \leq t \leq t_{p1}; \\ \frac{U_0 t_{p1}}{w_1}, & \text{если } t > t_{p1}, \end{cases} \quad (4)$$

где U_0 – амплитуда импульса; t_{p1} – длительность.

Максимальное значение магнитного потока

$$\Phi_m = \frac{U_0 t_{p1}}{w_1}. \quad (5)$$

Для синусоидального источника питания

$$U_1 = U_0 \sin(\omega t)$$

магнитный поток

$$\Phi = \frac{U_0}{w_1 \omega} [1 - U_0 \cos(\omega t)]. \quad (6)$$

Максимальное значение магнитного потока

получается, когда $\omega t = \frac{\pi}{2}$, т.е.

$$\Phi_m = \frac{U_0}{w_1 \omega}. \quad (7)$$

Максимальное значение магнитного потока подбирается так, чтобы не произошло магнитное насыщение материала магнитопровода.

Когда магнитный поток достигнет максимального значения, к вторичной обмотке подключается нагрузка, а источник питания отключается от первичной обмотки.

Часть от первичной обмотки. Уравнения магнитной цепи и электрической цепи, включающей вторичную обмотку, запишутся

$$\Phi R_{M\delta} = w_2 i_2; \quad (8)$$

$$0 = R i_2 + w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (9)$$

где i_2 – электрический ток во вторичной обмотке; w_2 – число витков вторичной обмотки; R – активное сопротивление нагрузки.

Подставляя значение тока из (8) в (9) и производя простые преобразования, получим дифференциальное уравнение для магнитного потока:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{RR_{M\delta}}{w_2^2} \Phi = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) имеет следующее решение

$$\Phi = C \exp \left(-\frac{RR_{M\delta}}{w_2^2} t \right). \quad (11)$$

Константа интегрирования для начальных условий $t = t_1$, $\Phi = \Phi_0$

$$C = \Phi_0 \exp \left(\frac{RR_{M\delta}}{w_2^2} t_1 \right). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), получаем:

$$\Phi = \Phi_0 \exp \left(-\frac{RR_{M\delta}}{w_2^2} (t - t_1) \right). \quad (13)$$

Электрический ток во вторичной обмотке и нагрузке

$$i_2 = \frac{\Phi_0 R_{M\delta}}{w_2} \exp \left(-\frac{RR_{M\delta}}{w_2^2} (t - t_1) \right). \quad (14)$$

Энергия импульса на нагрузке

$$W_{P2} = R \int_{t_1}^{\infty} i_2^2 dt = \frac{RR_{M\delta}^2 \Phi_0^2}{w_2^2} \times \\ \times \int_{t_1}^{\infty} \exp \left(-\frac{2RR_{M\delta}}{w_2^2} (t - t_1) \right) dt = \frac{1}{2} \Phi_0^2 R_{M\delta}. \quad (15)$$

Рассмотрим вариант, когда при определенных условиях нагрузка может быть непрерывно подключена к обмотке, что упрощает схему управления трансформатором. В этом случае происходит одновременно передача энергии от источника питания на нагрузку, как в обычном трансформаторе, и накопление энергии в магнитной подсистеме с последующей передачей её на нагрузку, как в ИМС трансформаторе. Уравнения для электрических цепей аналогичны (2) и (9), для магнитной цепи

$$\Phi R_{M\delta} = w_1 i_1 + w_2 i_2. \quad (16)$$

Для источника питания с прямоугольной формой импульса выражение для магнитного потока совпадает с (4). Подставляя (4) в (9), получаем выражение для электрического тока во вторичной обмотке:

$$i_2 = \begin{cases} -\frac{w_2}{w_1} \frac{U_0}{R}, & \text{если } 0 \leq t \leq t_{P1}; \\ 0, & \text{если } t > t_{P1}. \end{cases} \quad (17)$$

Электрический ток на нагрузке согласно (17) имеет форму прямоугольного импульса, как и импульс напряжения источника питания.

Подставляя (4) и (17) в (16) после простых преобразований, получаем выражение для электрического тока в первичной обмотке:

$$i_1 = \begin{cases} \frac{U_0 R_{M\delta}}{w_1^2} t + \frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{U_0}{R}, & \text{если } 0 \leq t \leq t_{P1}; \\ \frac{U_0 R_{M\delta} t_{P1}}{w_1^2}, & \text{если } t > t_{P1}. \end{cases} \quad (18)$$

Запишем уравнение для баланса энергий. Для этого умножим (2) на i_1 , а (9) на i_2 . Полученные выражения с учётом (16) сложим и проинтегрируем

$$\int_0^{t_{P1}} U_1 i_1 dt = R \int_0^{t_{P1}} i_2^2 dt + \frac{1}{2} \Phi^2 R_{M\delta}. \quad (19)$$

Таким образом, согласно (19) энергия источника питания потребляется нагрузкой и идёт на накопление магнитной энергии.

Энергия, потребляемая нагрузкой,

$$W_R = R \int_0^{t_{P1}} i_2^2 dt = \frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{U_0^2 t_{P1}}{R}. \quad (20)$$

Накопленная магнитная энергия

$$W_M = \frac{1}{2} \Phi^2 R_{M\delta} = \frac{U_0^2 R_{M\delta} t_{P1}^2}{w_1^2}. \quad (21)$$

Магнитная энергия расходуется на создание мощного импульса, а энергия, потребляемая нагрузкой во время накопления магнитной энергии, в этом случае является бесполезной, и поэтому условие применимости непрерывного режима подключения нагрузки запишется так:

$$\frac{W_R}{W_M} = \frac{2w_2^2}{RR_{M\delta}t_{P1}} \ll 1. \quad (22)$$

Для анализа ИМС трансформатора использовались упрощённые уравнения, которые позволили получить выражения в аналитическом

виде. Для расчётов и оптимизации трансформатора необходимо использовать систему из более полных уравнений.

С учётом активных сопротивлений обмоток и магнитного сопротивления магнитопровода

$$U_1 = R_1 i_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (23)$$

$$0 = R_2 i_2 + w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (24)$$

$$\Phi(R_{M\delta} + R_m) = w_1 i_1 + w_2 i_2; \quad (25)$$

где R_1 – активное сопротивление первичной обмотки; R_2 – активное суммарное сопротивление нагрузки и вторичной обмотки; R_m – магнитное сопротивление магнитопровода.

После простых преобразований уравнения приводятся к виду, удобному для применения математических пакетов программ,

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{R_1 R_2 (R_{M\delta} + R_m)}{w_1^2 R_2 + w_2^2 R_1} \Phi + \frac{U_1 R_2 w_1}{w_1^2 R_2 + w_2^2 R_1}; \quad (26)$$

$$i_1 = \frac{U_1}{R_1} - \frac{w_1}{R_1} \frac{d\Phi}{dt}; \quad (27)$$

$$i_2 = -\frac{w_2}{R_2} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (28)$$

Магнитное сопротивление R_m в общем случае является функцией магнитного потока Φ . Уравнения для энергий могут быть получены аналогично [3]. Решение системы уравнений осуществляется аналогично [2, 3].

Для увеличения энергии магнитного поля в немагнитном зазоре могут быть расположены проводящие элементы, которые направляют магнитный поток по пути с более высоким магнитным сопротивлением (рис.2). Для уменьшения

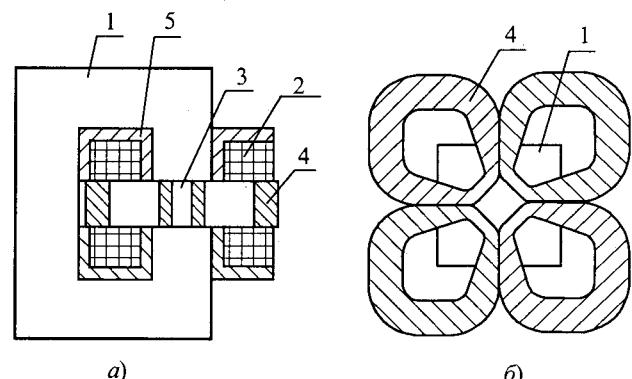


Рис.2. ИМС трансформатор:

а – общая конструктивная схема; б – система короткозамкнутых витков в немагнитном зазоре; 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – немагнитный зазор; 4 – короткозамкнутый виток; 5 – электропроводящий элемент

ния потоков рассеяния обмотку необходимо экранировать проводящими элементами (рис.2,а), как описано в [4].

В систему уравнений трансформатора с электропроводящими элементами должны быть добавлены уравнения электрических цепей для короткозамкнутых витков, а уравнение магнитной цепи – заменено двумя уравнениями магнитных цепей: для магнитного потока, проходящего через короткозамкнутые витки, и для потока, проходящего за пределами короткозамкнутых витков,

$$0 = R_3 i_3 + \frac{d\Phi_3}{dt}; \quad (29)$$

$$R_m \Phi + R_{m\delta} (\Phi - \Phi_3) = w_1 i_1 + w_2 i_2; \quad (30)$$

$$R_m \Phi + R_{m\delta_3} \Phi_3 = w_1 i_1 + w_2 i_2 + i_3, \quad (31)$$

где R_3 – активное сопротивление короткозамкнутого витка; i_3 – ток в короткозамкнутом витке; Φ_3 – магнитный поток, связанный с короткозамкнутым витком; $R_{m\delta_3}$ – магнитное сопротивление зазора в пределах перекрытия полюса короткозамкнутым витком.

Если источник питания подключается к обмотке в момент времени $t = 0$, то начальные условия $\Phi_0 = 0$ и $\Phi_{30} = 0$. В этом случае при пренебрежении активным сопротивлением короткозамкнутого витка из (29) следует, что $\Phi_2 = 0$. Таким образом, магнитный поток вытесняется короткозамкнутым витком и проходит по более узкому пути с более высоким магнитным сопротивлением, что и приводит к дополнительному увеличению магнитной энергии в немагнитном зазоре (1).

Толщина электропроводящих элементов обмотки подбирается в соответствии с толщиной скин-слоя.

Трансформатор может содержать также только одну обмотку для осуществления цикла работы, к которой вначале подключается источник питания, а затем нагрузка и отключается источник питания. Электромагнитные системы с накоплением магнитной энергии широко ис-

следовались на математической модели, построенной с использованием дифференциальных уравнений [3].

Результаты исследования показали значительное улучшение энергетических характеристик: увеличение удельной мощности более чем в 3 раза, а КПД – на 20%. Отсутствие подвижных частей в импульсных трансформаторах облегчает экранирование диамагнитных зазоров и обмоток, что создает потенциальные возможности повышения энергетических показателей в более широком диапазоне.

Таким образом, рассмотренный импульсный трансформатор с магнитным сопротивлением позволяет увеличить энергию импульса по сравнению с энергией, получаемой в обычном трансформаторе. Проанализировано влияние электропроводящих элементов, которые уменьшают потоки рассеяния и направляют магнитный поток по пути с более высоким магнитным сопротивлением, улучшая дополнительно, таким образом, его энергетические показатели. Согласно приведенной методике было изготовлено и испытано устройство питания шагового электродвигателя марки Z22LT195 4~2A S1 1P40 (CSSR), используемого в электронных устройствах печати. Импульсный трансформатор используется в схеме трехфазного исполнения.

Список литературы

1. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Караваев В.Т., Данецкий А.Н., Запольских С.Н. Математическая модель трансформатора в устройствах поворотки и наладки автоматических выключателей // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции "Наука – производство – технологии – экология". Киров: Изд-во ВятГТУ, 2001, Т.3. С.96–97.
3. Караваев В.Т., Запольских С.Н. Импульсные электрические машины магнитного сопротивления. Киров.: Вят. гос. техн. ун-т., 2001.
4. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.П., Васюкевич П.В. Накопители энергии. Электродинамические накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 1991. С.333–394.

Экспертная поддержка при диагностике состояния силовых трансформаторов

ПОПОВ Г.В., ВАТЛЕЦОВ А.В., АЛЬ-ХАМРИ С.С.

Рассмотрены вопросы повышения достоверности оценки состояния силовых трансформаторов при их эксплуатации на базе использования экспертных систем.

Оценка состояния и диагностика любых объектов опираются на соответствующую классификацию дефектов. Не являются исключением и силовые трансформаторы, для которых

Questions of increasing the estimation reliability of a condition of power transformers are considered at their operation on the basis of application of expert systems.

предложены разные подходы к подобной классификации, подробно рассмотренные в [1]. Там же была представлена достаточно логичная, но, как оказалось при практическом использовании, весьма громоздкая схема классификации дефектов.

Анализ показал, что решение данного, одного из ключевых в диагностике, вопроса возможно в рамках определенного компромисса, результатом которого может быть классификация дефектов в силовых масляных трансформаторах, представленная на рис.1. Эта схема положена в основу новой версии автоматизированной оценки состояния силовых трансформаторов "Диагностика+".

Несовершенство любой формализации подобного процесса объясняется следующими причинами:

- требованием наглядности;
- явлением синонимии, когда одно и то же явление называется по-разному;
- динамикой развития повреждения, в которой один исследователь выделяет одно звено и по его названию присваивает имя всему дефекту, а другой – смежное звено, но, естественно, имеющее другое название.

В любом объекте различают скорости аномальных процессов [2]:

- развитие повреждения во времени практически не происходит;
- дефект развивается медленно, т.е. имеет место "вялотекущий" характер процесса;
- при одних режимах работы оборудования имеет место первая ситуация, при других – вторая;
- дефект развивается быстро, результатом чего является действие защиты или авария.

К счастью, в силовых трансформаторах случаи стремительного развития аварийных процессов встречаются относительно редко. В статье такие ситуации не рассматриваются.

В качестве примера рассмотрим цепочку развития дефекта от его зарождения до завершения с таким названием как "пожар в стали":

- замыкание через заусенцы соседних листов электротехнической стали;
- появление вихревых токов, протекающих через смежные листы;
- дополнительный перегрев рассматриваемого пакета, постепенное разрушение межлистовой изоляции (например, бумажной в горячекатаной стали);
- нарастание ЭДС;
- увеличение вихревых токов, рост локально-го перегрева стали;

- деструкция межлистовой изоляции из-за высокой температуры, потенциала, воздействия масла;

- образование короткозамкнутого контура, охватывающего определенную площадь активной стали, которая постепенно увеличивается;

- значительный разогрев участка магнитопровода и прилегающих металлоконструкций;

- деструкция изоляции шпилек и полубандажей;

- "пожар в стали".

В приведенном сценарии можно выделить три-четыре звена, названия которых могли бы дать имя и собственно дефекту. Из рис.1 видно, что в предлагаемой классификации рассмотренный процесс соответствует позиции 2.2.

Использование различными авторами собственных подходов к классификации дефектов в силовых трансформаторах вызывает ряд трудностей в практической деятельности по оценке их состояния. Так, в [3] приводится методика, позволяющая с высокой вероятностью выявлять дефекты, перечень которых в этом же руководящем документе содержится. Допустим на его основе в некотором трансформаторе определен термический дефект в интервале температур от 150 до 300°C. Поскольку детерминированные подходы в современной технической диагностике не используются, то для учета нечеткости информации обычно применяют вероятностные механизмы, коэффициенты доверия (КД) и т.д. Будем считать, что дефект, о котором идет речь, определен с КД = 0,8.

Современная экспертная диагностическая система, например "Диагностика+" [4], получив подобный результат, будет его "рассматривать" как промежуточный и поставит задачу по детализации вида дефекта посредством перехода к схеме на рис.1. При этом вероятен целый набор состояний 1.6, 2.2, 2.3, 3.1, 4.2 и т.д. с существенным уменьшением коэффициентов доверия для каждого конкретного случая (аналогично вероятностному закону о группе событий). Чтобы повысить достоверность результата, экспертная система "должна" привлечь дополнительную информацию и соответственно инициировать новые диагностические правила, которые играют следующую роль:

- перераспределяют коэффициенты доверия в группе событий на основе априорной информации;

- повышают коэффициенты доверия отдельных событий из группы на базе апостериорной информации.

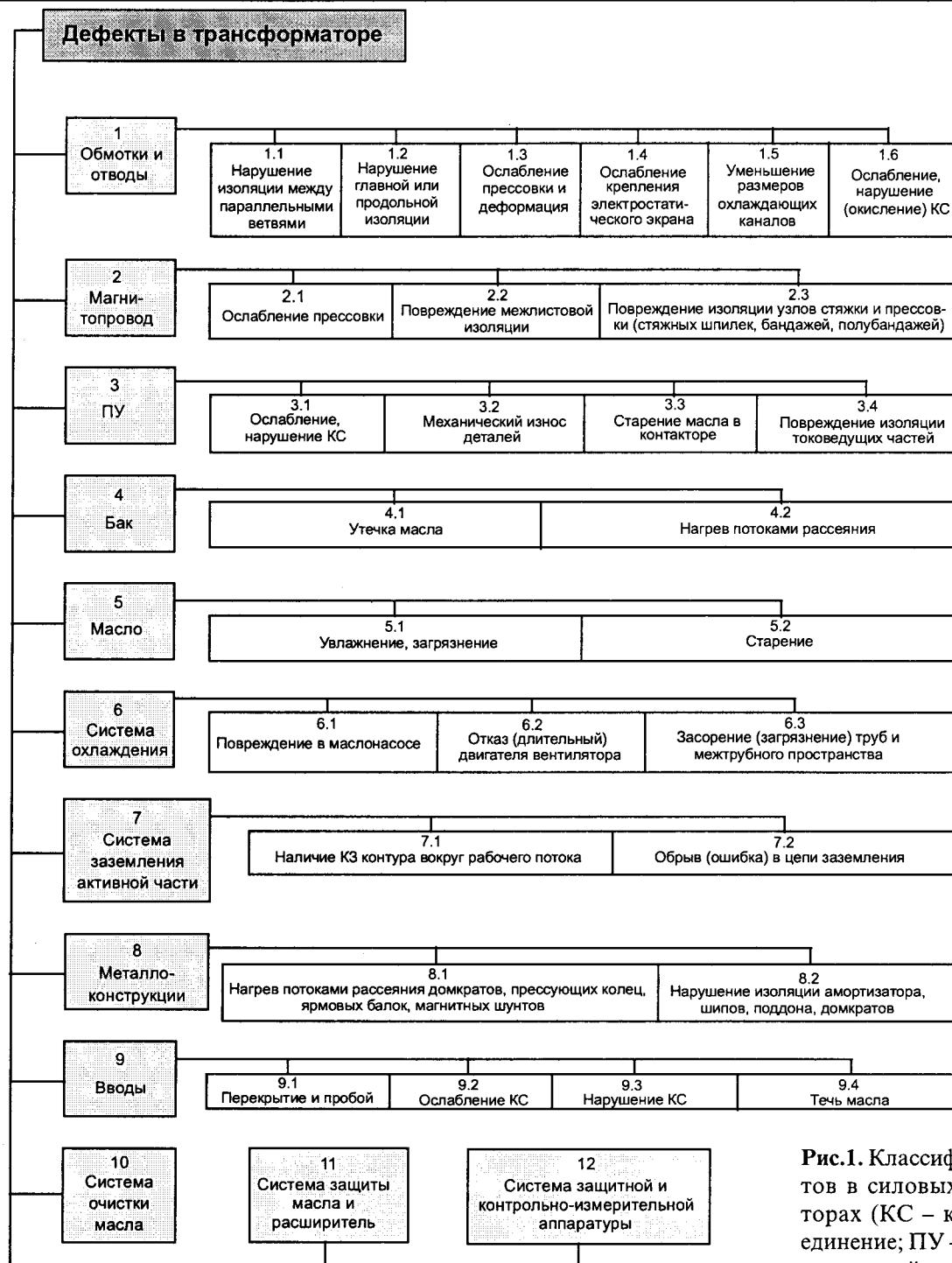


Рис.1. Классификация дефектов в силовых трансформаторах (КС – контактное соединение; ПУ – переключающее устройство; КЗ – короткозамкнутый)

К информации первого вида относится, например, следующая:

– статистика повреждений трансформаторов соответствующего класса напряжения, содержащаяся, например в [5];

– сведения о "слабых местах" в определенных партиях трансформаторов [6] типа содержащихся в таблице и т.д.

В качестве примера рассмотрим технологию использования информации, приведенной в таб-

лице. Сначала администратор на внутреннем языке системы "Диагностика+" *Z* записывает ряд правил. Следует отметить, что при разработке языка *Z* одной из главных задач была возможность его применения конечным пользователем, для чего язык должен быть максимально простым. Для исключения необходимости приведения здесь синтаксиса языка *Z* одно из правил приводится ниже на естественном языке: **"ЕСЛИ тип рассматриваемого трансформатора**

ра соответствует ТДЦГ-90000/220 **И** этот трансформатор изготовлен не позднее 1966 года. **И** в этом трансформаторе не было модернизации обмотки ВН, **ТО** возможна деструкция изоляции обмотки ВН".

Затем это и подобные правила (всего 14) заносятся в базу знаний экспертной системы. При оценке состояния очередного трансформатора в случае подозрения на дефект в обмоточной системе (дефекты типа 1.2 и 1.5) данное правило будет автоматически привлечено для анализа. В случае его истинности (на каждую из трех составляющих условия должен быть дан утвердительный ответ) существенно повышается вероятность дефектов указанных типов в обмотке высокого напряжения. Если в базе знаний экспертной системы имеются другие подходящие к ситуации правила, то она и их должна будет автоматически использовать. В каждом таком случае коэффициент доверия оценки состояния объекта и последующих рекомендаций будет повышаться.

Понятно, что априорная информация должна заноситься в базы знаний и данных экспертной системы не по принципу актуальности, а в случае ее доступности. Иными словами, при появлении подобных сведений в "поле зрения" администратора системы они должны после соответствующей обработки оказаться в экспертной системе и "ждать своего часа". Очевидно, что пока такой, казалось бы не относящейся к конкретной ситуации, информации немного, она су-

щественного влияния на результат оценки состояния конкретного объекта оказывать не будет. Однако при достижении некоторой "критической массы" занесенные как бы "про запас" в экспертную систему сведения начинают заметно повышать достоверность формируемых оценок и рекомендаций.

К этому же виду относится информация, содержащаяся в специальной базе дефектов, которая организована в последней версии "Диагностики+". Она представлена данными из результатов вскрытия трансформаторов, выведенных в ремонт. Обычно эти сведения, собираемые из разных источников, содержат описание дефектного процесса в трансформаторе и некоторые результаты его испытаний до момента срабатывания защиты или аварии. Все это, а также тип трансформатора, год изготовления, продолжительность эксплуатации и т.п. заносятся в базу дефектов. Наиболее ответственным этапом формализации этой информации является идентификация вида дефекта по предлагаемой классификации на основе имеющегося в распоряжении администратора (эксперта) вербального описания. В дальнейшем предполагается также заносить в базу и изображения последствий дефекта посредством сканирования обычных или непосредственного ввода цифровых фотографий. Определенный опыт этого уже имеется. Так, при вскрытии трансформатора ТДЦ-125000/110 Ивэнерго последствия выявленного дефекта (7.1. Наличие короткозамкнутого контура вокруг рабочего потока) были сфотографированы и занесены в базу.

Эффективность подобной деятельности будет определяться объемом базы дефектов. В настоящее время важность этого вопроса многими недооценивается. Однако, как справедливо указывается в [6], системы сбора, систематизации и анализа информации о состоянии оборудования (особенно отказах и дефектах) имеют ключевое значение. Зарубежные организации, функционирующие в условиях жесткой конкуренции, находят стимулы для эффективного и добровольного сотрудничества в этой области.

Во многих энергосистемах РФ имеются специалисты, прекрасно понимающие огромную важность подобной деятельности, которая ими в большинстве случаев много лет ведется на инициативных началах. Интеграция и систематизация этой информации, ее доступность для определенного круга пользователей, например через сеть Интернет, позволили бы существенно облегчить решение многих сложных вопросов, свя-

Таблица

Тип трансформатора	Повышенный нагрев обмотки	Год изготовления
ТДЦГ-90000/220	ВН	До 1966 г. включительно
ТДГ-120000/220 (НН на 13,8 кВ)	—"—	—"—
ТДЦГ-125000/220	—"—	—"—
ТДЦГ-180000/220	ВН, НН	—"—
АТДЦГ-180000/220	ВН	—"—
АТДЦГ-120000/220	—"—	—"—
АТДЦГ-240000/220	—"—	—"—
ТДЦГА-180000/220	—"—	—"—
АТДЦН-125000/220	—"—	—"—
АОДТГ-90000/500	—"—	1957-1961
АОДЦГ-90000/500	—"—	1958-1966
ОДЦГА-135000/500	—"—	1957-1966
ОДЦГ-210000/500	ВН, НН	1963-1967
ОДТГ-90000/400	ВН	1955-1958

занных со стареющим оборудованием. Без сомнения, к подобной совместной деятельности присоединились бы многие энергопредприятия из стран СНГ.

На роль технического исполнителя и координатора этой работы, на наш взгляд, мог бы претендовать Ивановский государственный энергетический университет (ИГЭУ), где достигнут определенный уровень развития компьютерных технологий и даже начато создание информационного портала по трансформаторам (www.transform.ru), на котором уже сейчас реально проведение консультаций, обмена мнениями, форумов и т.д. заинтересованных специалистов. На базе этого университета можно было бы организовать и учебный центр по подготовке и переподготовке специалистов, на необходимость чего также обращается внимание в [6]. Для экономии средств на транспортные расходы, на наш взгляд, необходимо активнее внедрять технологии дистанционного обучения, в создании которых в ИГЭУ также достигнуты определенные результаты.

Вернемся к описанию экспертной поддержки при оценке состояния силовых трансформаторов. В "Диагностике+" на базе дефектов функционирует запросная система, которая для конкретного аномального случая, подлежащего распознаванию, организует поиск и анализ информации, помогающей прояснить ситуацию.

Привлечение апостериорной информации в "Диагностике+" строится в соответствии со схемой, приведенной на рис.2. На схеме рис.2 все действия персонала (затемненные блоки) и работа экспертной системы связаны с анализом трех множеств: испытаний – \mathbf{I} , дефектов – \mathbf{D} и признаков – \mathbf{P} . База знаний, основу которой составляют правила и алгоритмы, написанные на языке Z с учетом рекомендаций руководящих документов типа [4, 7], на рис.2 укрупненно представлена в виде двух матриц: испытание-дефект ($\mathbf{I}\text{-}\mathbf{D}$) и признак-дефект ($\mathbf{P}\text{-}\mathbf{D}$).

Матрица $\mathbf{I}\text{-}\mathbf{D}$ (рис.3) в настоящее время содержит 21 вид испытаний силовых трансформаторов (автотрансформаторов) в соответствии с [7]. Понятно, что рассматриваемая матрица должна постоянно корректироваться, главным образом, в плане добавления новых испытаний, которые постоянно появляются и доказывают свою эффективность. Неотъемлемым элементом матрицы $\mathbf{I}\text{-}\mathbf{D}$ являются значения КД, которые на рис.3 не указаны. Что касается матрицы $\mathbf{P}\text{-}\mathbf{D}$, то в явном виде ее формировать обычно не требуется. В "Диагностике+" эта матрица

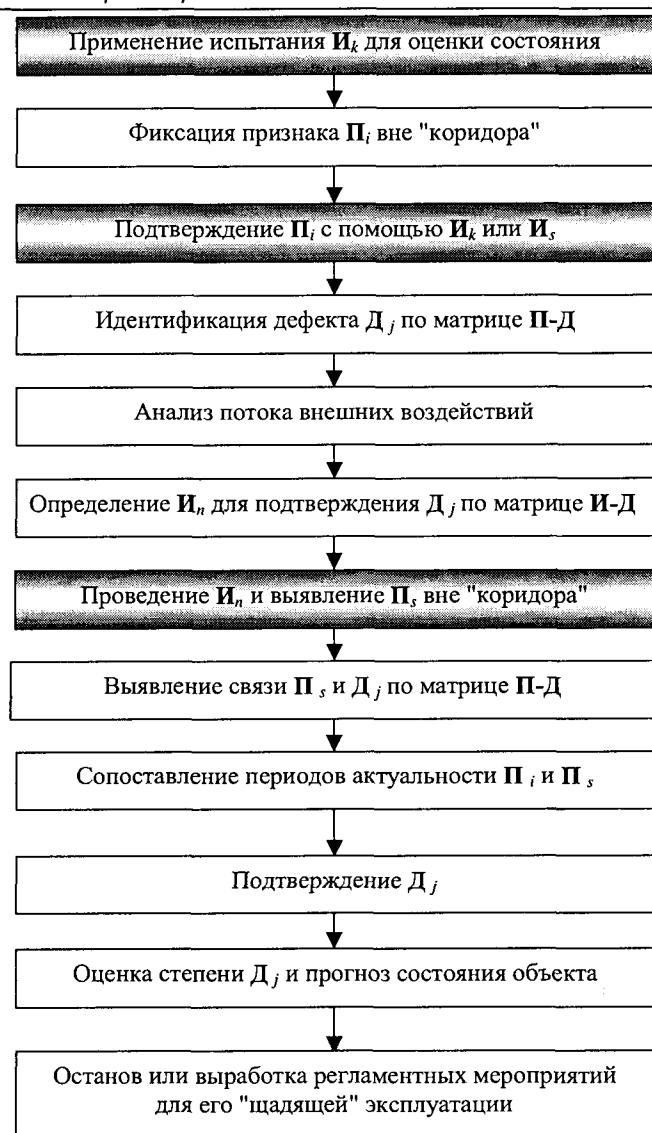


Рис.2. Схема оценки состояния объекта

представлена набором правил на языке Z . Все правила, матрицы и другие формализованные фрагменты знаний хранятся в специальной базе знаний, откуда вызываются "машиной вывода" экспертной системы для автоматического участия в процессе анализа соответствующего оборудования. Кроме того, любые сведения из базы знаний являются доступными для администратора системы на предмет возможных корректировок.

Процесс оценки состояния объекта предполагает:

– выявление выхода одного или нескольких контролируемых параметров за нормируемые значения; в общем случае двухсторонних ограничений ("сверху" и "снизу") имеется "коридор", в котором, как известно, должен находиться контролируемый параметр;

Дефекты по рис. 1	Испытания по [7]																			
	6.2	6.3	6.4.1	6.4.2	6.5	6.6.1	6.6.2	6.7.1	6.7.2	6.7.3	6.8	6.11	6.12	6.13	6.14	6.15	6.17	6.18	6.19	6.20.4
1.1	+	+	+		+	+					+									
1.2	+	+	+		+	+	+	+			+									+
1.3												+								
1.4	+																			
1.5													+							
1.6	+										+									+
2.1																				
2.2	+										+									
2.3	+			+					+											
3.1	+										+		+							
3.2													+							
3.3	+																			
3.4	+		+											+						
4.1															+					
4.2	+																			+
5.1				+																+
5.2	+				+															+
6.1	+																			+
6.2																				+
6.3																				+
7.1	+																			+
7.2	+																			+
8.1	+																			+
8.2	+																			+
9.1	+					+														+
9.2	+																			+
9.3	+																			+
9.4																				+
10		+																		+
11		+															+	+		
12											+							+		

Рис.3. Матрица И-Д

– подтверждение предварительных результатов с помощью того же или другого испытания для исключения возможных ошибок (измерений, ввода информации в компьютер и т.д.);

– учет "истории жизни" объекта, т.е. сопоставление его состояния со всеми воздействиями, которым он подвергался в процессе эксплуатации; здесь необходимо учитывать степень значимости как собственно воздействия, так и прошедшего с момента его действия времени, т.е. "период актуальности" анализируемого события.

Любой вывод и рекомендацию экспертной системы пользователь всегда может детально проверить на основе анализа так называемой трассы, которая содержит цепочку правил, при выполнении которой формируется конкретная рекомендация.

Современные информационные технологии позволяют обеспечить практически любую степень наглядности процессов, происходящих в объекте, состояние которого является предметом анализа. В частности, для набора типовых дефектов могут быть разработаны анимационные

10

сюжеты их развития. Для инициирования запуска подобного сюжета необходима определенная степень неблагополучия в объекте, выявленная экспертной системой. Затем, по желанию пользователя, запускается графическая подсистема, в которой это неблагополучие трансформируется не в рекомендацию (что привычно), а в виртуальный сюжет, в рамках которого возможно и некоторое прогнозирование развития рассматриваемой ситуации. Естественно, что для работы экспертной системы в подобном режиме требуются знания и соответственно правила другого вида.

На рис.4 в качестве примера показаны фрагменты анимационного фильма по развитию повреждения, рассмотренного в начале статьи. Развитие сюжета ограничено этапом, когда участок ярмовой балки получил значительный разогрев, который вызвал бурный процесс разложения трансформаторного масла.

На экране можно наблюдать даже распространение цветов побежалости на участке ярмовой балки. Для разработки мультфильма была

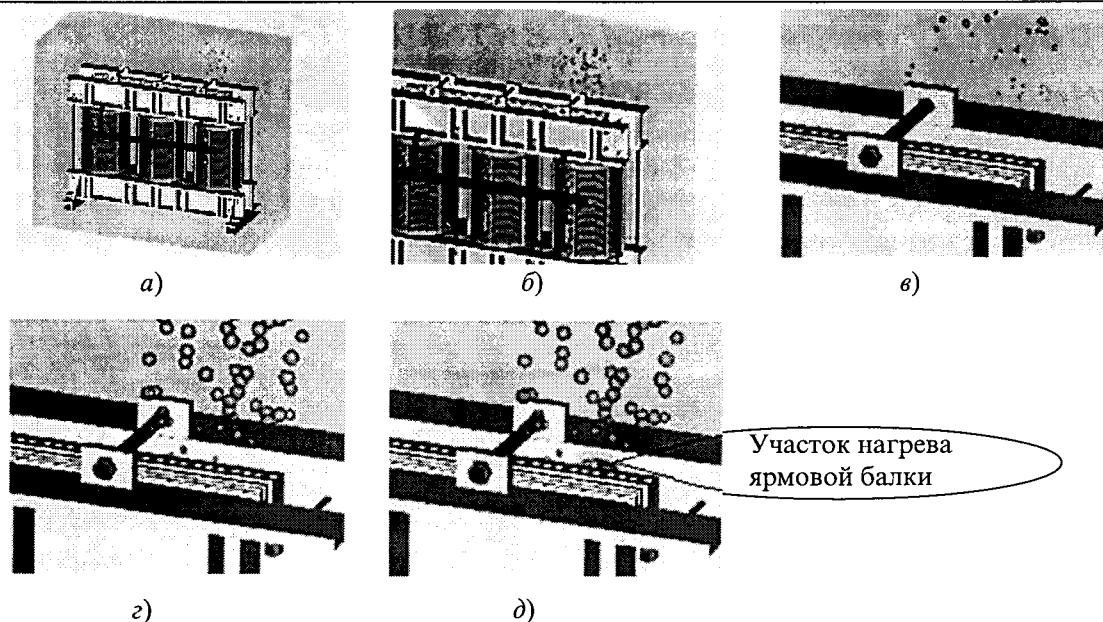


Рис.4. Фрагменты анимационного сюжета по развитию дефекта

использована информация из [8, 9]. Следует заметить, что некоторые детали в рассмотренном примере были несколько утрированы для наглядности. В частности, это касается размеров газовых пузырьков.

На наш взгляд подобная демонстрация процессов, происходящих в трансформаторе, и стремление обеспечить определенную степень адекватности виртуальных моделей реальным объектам сегодня могут быть оправданы только в учебных целях, однако тенденции в развитии информационных технологий дают право предположить, что завтра подобные подходы станут основой и при принятии управленческих и технологических решений.

Дополнительная информация о системе "Диагностика+" представлена на сайте www.bjd.ispu.ru.

Список литературы

1. Виноградова Л.В., Игнатьев Е.Б., Лхамсурэнгийн Т., Попов Г.В. Классификация дефектов в силовых масляных трансформаторах // Высоковольтная техника и электротехнология. Иваново: ИГЭУ, 1999. С.36–41.
2. Беркович Я.Д. О диагностике энергетического оборудования // Электрические станции. 1989. № 6. С.16–20.
3. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. М.: РАО "ЕЭС России", 2001.
4. Попов Г.В., Игнатьев Е.Б. О совершенствовании технологий диагностирования маслонаполненного электротехнического оборудования // Новое в российской энергетике. 2001. № 7. С.28–32.
5. Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю. и др. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–

500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. 2001. № 9. С.53–58.

6. РД 34.46.501. Инструкция по эксплуатации трансформаторов. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Энергия, 1978.

7. Лоханин А.К., Соколов В.В. Обеспечение работоспособности маслонаполненного высоковольтного оборудования после расчетного срока службы // Электро. 2002. № 1. С.10–16.

8. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования: Издание шестое. М.: ЭНАС, 1998.

9. Смирнов М.А. Газовыделение при повреждениях силовых трансформаторов // Тр. ВНИИЭ. 1976. Вып. 49. С.43–49.

10. Смирнов М.А., Касаткина Т.Е., Гусева Г.П. Дефекты в маслонаполненных силовых трансформаторах, вызывающие разложение электрической изоляции с выделением газообразных продуктов // Тр. ВНИИЭ. 1980. Вып. 60. С.10–39.

Попов Геннадий Васильевич – профессор, зав. кафедрой "Безопасность жизнедеятельности" Ивановского государственного энергетического университета. Окончил электромеханический факультет Ивановского ГЭУ в 1971 г. Защитил докторскую диссертацию по теме "Методы и средства автоматизированного проектирования силовых трансформаторов" в МЭИ в 1991 г.

Ватлецов Андрей Владимирович – аспирант кафедры "Безопасность жизнедеятельности" Ивановского ГЭУ. Окончил факультет информатики и вычислительной техники Ивановского ГЭУ в 2000 г.

Аль-Хамри Саид Сейф Сабир – аспирант кафедры "Безопасность жизнедеятельности" Ивановского ГЭУ. Окончил электромеханический факультет Ивановского ГЭУ в 2001 г.

К расчету перехода магнитного потока через границу двух сред с учетом анизотропии среды

ИВАНЧЕНКО О.Н., ЭНДИК В.А.

Рассмотрены вопросы прохождения магнитного потока через границу двух сред, одна из которых является анизотропной электротехнической сталью. Для учета анизотропии предложены простые зависимости, связывающие значение функций углов, которые образуют разно-

направленные векторы \vec{B} и \vec{H} с нормалью к границе раздела сред. Результаты исследования могут быть использованы в расчетах характеристик ХХ трансформаторов с плоской шихтованной магнитной системой.

При расчете характеристик ХХ трансформаторов с плоской шихтованной магнитной системой приходится рассчитывать падение магнитного напряжения в зонах стыков магнитной системы.

Из [1, 2] известно, что у анизотропной электротехнической стали векторы магнитной индукции \vec{B} и напряженности магнитного напряжения \vec{H} при перемагничивании под углом к направлению прокатки не совпадают по направлению. Угол Ψ между векторами \vec{H} и \vec{B} достигает десятков градусов и зависит от значения индукции.

Угол Ψ близок к нулю:

- при намагничивании стали вдоль направления легкого намагничивания (направления прокатки);
- при намагничивании поперек направления прокатки или под углом 55° к направлению прокатки;
- при сильном магнитном насыщении (индукция близка к индукции насыщения).

На рис.1 показаны векторы \vec{B}_1 , \vec{H}_1 и \vec{B}_2 , \vec{H}_2 в средах 1 и 2 с границей раздела AB . Условие равенства нормальных составляющих индукции и касательных составляющих напряженности магнитного поля записываются в этом случае в виде

$$B_2 \cos \alpha_{2B} = B_1 \cos \alpha_{1B} \quad (1)$$

и (при условии, что в материале не протекают макроскопические слои тока, пронизывающие приграничный контур $stuy$, рис.1)

$$H_2 \sin \alpha_{2H} = H_1 \sin \alpha_{1H}. \quad (2)$$

Если обозначить $B_2/H_2 = \mu_2$, а $B_1/H_1 = \mu_1$, то, разделив (1) на (2), получим равенство

$$\frac{\mu_2(B_2)}{\mu_1(B_1)} = \frac{\cos \alpha_{1B}}{\cos \alpha_{2B}} \frac{\sin \alpha_{2H}}{\sin \alpha_{1H}}. \quad (3)$$

The problems of magnetic flux going through the boundary of two media, one of which is anisotropic steel have been considered. To account for anisotropy, there are suggested simple relations, connecting the value of function of angles, which form non-collinear vectors

\vec{B} and \vec{H} with a normal to the media boundary. Investigation results can be used in calculations of no-load characteristics of the transformers with plane-laminated magnetic system.

При $\alpha_{1B} = \alpha_{1H} = \alpha_1$ равенство (3) приобретает вид:

$$\frac{\mu_2(B_2)}{\mu_1(B_1)} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \frac{\sin \alpha_{2H}}{\cos \alpha_{2B}}. \quad (4)$$

Заметим, что у анизотропной стали значения μ различны при перемагничивании стали под разными углами к направлению прокатки и будут определяться по соответствующим кривым намагничивания при данных значениях B и H .

Когда обе среды изотропны ($\alpha_{1B} = \alpha_{1H}$ и $\alpha_{2B} = \alpha_{2H}$) равенство (4), в свою очередь, переходит в известное из учебников по ТОЭ соотношение

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1}. \quad (5)$$

Применение современных методов расчета, как например метода конечных элементов, наталкивается на ряд трудностей при попытке получить достаточно достоверную картину магнитного поля в зоне стыков при перемагничивании магнитной системы. Требуется получить

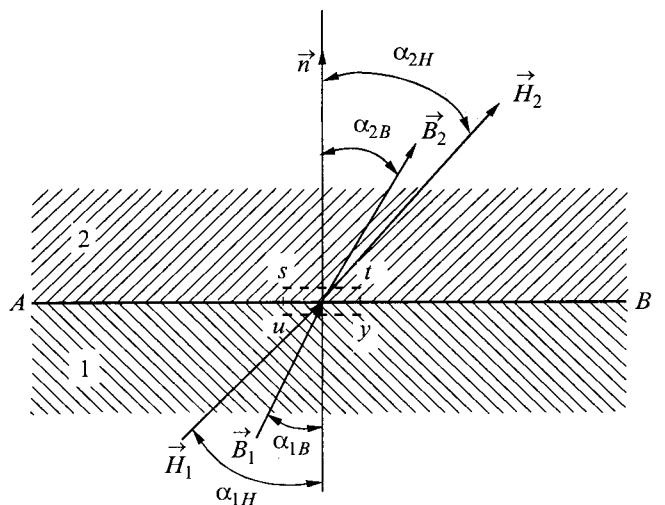


Рис.1. Направление векторов \vec{B} и \vec{H} на границе двух сред с учетом анизотропии

решение квазистационарных уравнений трехмерной задачи для нелинейной анизотропной и неоднородной среды (чередование слоев стали и карбидовой изоляции).

Наиболее достоверная картина распределения магнитной индукции в зоне косых стыков магнитной системы получена в [3] экспериментально.

В соседних листах моделей магнитных систем были просверлены отверстия диаметром 0,25 мм. В отверстия были продеты тонкие измерительные витки из проволоки диаметром 0,1 мм, при чем плоскости витков "в каждой точке" располагались под прямым углом друг к другу, чтобы определить составляющие вектора индукции в плоскости листа. Для измерения потока, перетекающего из листа в лист по нормали к плоскости листа, витки наклеивались на плоскость листа.

В [3] установлено, что индукция достигает максимума в полоске стали над (под) зазором в стыке соседнего слоя; магнитный поток, за исключением зоны стыков, остается направленным вдоль направления прокатки и только в зоне стыков вектор индукции отклоняется от направления прокатки стали на углы, которые достигают 30° .

К сожалению, в [3] ничего не говорится о напряженности магнитного поля \vec{H} в зоне стыков, тогда как именно через напряженность рассчитывают падение магнитного напряжения на участках магнитной цепи.

Определимся с вектором \vec{H} в зоне стыков.

При шихтовке в 2 положения пластин пакет магнитной системы сложен из одинаковых групп слоев по два слоя в группе. На рис.2,а показан условно первый (нижний) слой одной из групп, а на рис.2,б – второй (верхний) слой. На рис.2,в верхний слой наложен на нижний, зазор между нижними пластинами $U1$ и $U2$ показан пунктиром. Направление прокатки в пластинах показано стрелками.

Рассмотрим прохождение магнитного потока через зону стыков между линиями ab и gh (рис.2,в). Направление векторов \vec{B} и \vec{H} в зоне стыков определяется из граничных условий с учетом характеристики анизотропной стали [2].

В обеих пластинах $U1$ и $O1$ поток до зоны стыков идет по направлению прокатки zp . На некотором расстоянии от зазора большая часть потока из пластины $U1$ переходит в пластину

$O1$, оставшаяся часть проходит через зазор. Нормалью к границе ab является линия rq , направленная под углом 45° к направлениям прокатки в пластинах. Граничные условия в точке p нижней пластины могут быть описаны равенством (5).

Вдоль направления прокатки $\alpha_{1H} = \alpha_{1B} = \alpha_1 = 45^\circ$, а в воздушном зазоре $\alpha_{2H} = \alpha_{2B} = \alpha_2$.

Порядок величин μ_2 и μ_1 соответствует 10^{-6} и 10^{-2} , соответственно, так что

$$\operatorname{tg}\alpha_2 = \operatorname{tg}\alpha_1 \frac{\mu_2}{\mu_1} = 10^{-4} \cdot 1, \text{ т.е. } \alpha_2 \approx 10^{-4} \Rightarrow \alpha_2 = 0,$$

т.е. в зазоре \vec{H} и \vec{B} направлены по rq .

На рис.2,г показано сечение слоев по rq .

На границе слоев зазор – сталь (над зазором) условие равенства касательных составляющих векторов \vec{H} требует, чтобы и в верхнем слое векторы \vec{H} были направлены по rq .

В окрестности зазора условие равенства касательных составляющих векторов \vec{H} $H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$ в стали соседних пластин не соблюдается. Здесь выходящий из одного листа перед зазором и входящий в другой лист значительный магнитный поток создает макроскопические слои токов, проходящие через приграничный контур $fuvw$ циркуляции вектора \vec{H} (рис.2,г).

В точке q границы cd магнитный поток в нижнем слое переходит из воздуха в сталь. Пластины слоев разделены изоляционными покрытиями, у которых $\mu \approx \mu_0$.

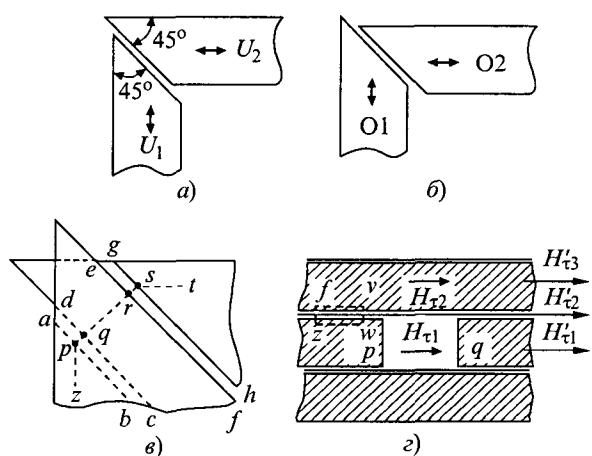


Рис.2. К определению направления магнитной напряженности в угловой части пакета магнитной системы:

а – нижний слой группы из двух пластин; б – верхний слой группы из двух пластин; в – верхний слой наложен на нижний; г – сечение слоев по rq

В средней части линии qr , равноудаленной от зазоров в верхней и нижней пластинах, значения индукции переходящей из одной пластины в другую пренебрежимо малы. Здесь должно соблюдаться граничное условие $H'_{\tau 1} = H'_{\tau 2} = H'_{\tau 3}$, где $H'_{\tau 1} = H'_{\tau 2} = H'_{\tau 3}$ – тангенциальные составляющие векторов в первой пластине, изоляционном промежутке и второй пластине. Если в верхней и нижней пластинах со взаимоперпендикулярными направлениями легкого намагничивания напряженности направлены одинаково, они должны быть направлены под углом 45° к обоим направлениям легкого намагничивания, т.е. вдоль линии qr .

Предполагается, что векторы \vec{H} во всех точках линии qr коллинеарны и направлены по qr , хотя модули у них разные.

Согласно [2], вектор \vec{B} направлен под различными углами к направлению вектора \vec{H} в зависимости от значения индукции, например, 5° при $B = 1,8$ Тл и 30° при $B = 0,8$ Тл.

Для проверки сделанного предположения о том, что направление векторов \vec{H} совпадает с qr по крайней мере в точке q нижней пластины, рассмотрим граничные условия в точке q при переходе потока из зазора в сталь.

Согласно кривой намагничивания стали под углом 45° к направлению прокатки [4], величина μ_2 при индукциях до 1 Тл имеет порядок 10^{-2} , при больших индукциях – до 10^{-4} и менее, $\mu_1 = \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$, как было указано выше угол $\alpha_{2B} = 5 \div 30^\circ$, т.е. $\cos \alpha_{2B} = 0,99 \div 0,866$, $\alpha_1 = 0$.

Используя равенство (4), получаем:

$$\sin \alpha_{2H} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \operatorname{tg} \alpha_1 \cos \alpha_{2B} = 0,$$

т.е. \vec{H} направлена вдоль qr .

Таким образом, для расчета тока XX необходимо иметь характеристики намагничивания стали заданной марки вдоль направления прокатки и под углом 45° к этому направлению.

Обмотка возбуждения трансформатора подключена к синусоидально изменяющемуся напряжению, так что индукция в стержне изменяется по синусоиде $B = B_m \sin(\omega t + \phi)$. Для расчета тока XX [5] используют, в основном, петли гистерезиса. Из семейства динамических петель гистерезиса, характеристики которых заложены в банк данных, программа выбирает нужную петлю.

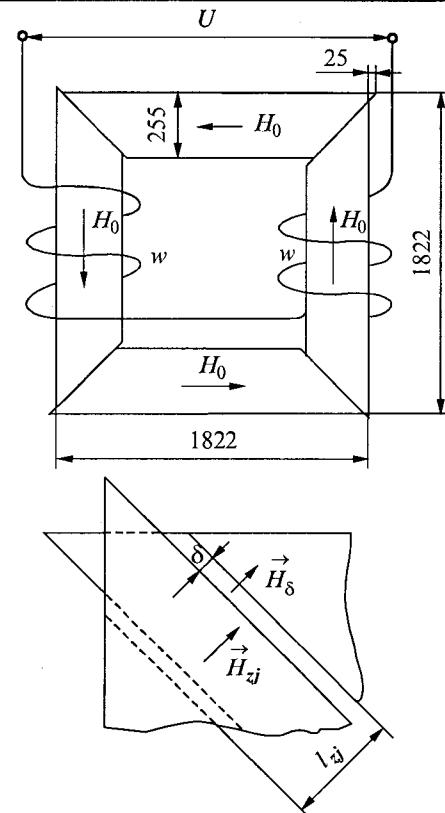


Рис.3. Магнитная система модели

Кривые намагничивания и кривые, выражающие зависимость удельных потерь от магнитной индукции, играют вспомогательную роль. Намагничающая мощность в расчете не используется.

Ограничимся примером расчета тока XX и потерь от простейшей модели магнитной системы рис.3.

Ток XX рассчитывается из закона полного тока при обходе контура магнитной системы

$$i_0 w = 4L_0 H_0(\omega t) + 4\delta H_\delta(\omega t) + 4L_{zj} H_{zj}(\omega t), \quad (6)$$

где $w = 120$ – число витков; L_0 – длина пластины, в которой магнитный поток проходит по направлению проката, $L_0 = 1477$ мм; $H_0(\omega t)$ – зависимость напряженности магнитного поля вдоль направления прокатки, соответствующая петле гистерезиса при $B_m = 1,6$ Тл; $\delta = 0,1$ мм – ширина зазора; L_{zj} – длина перекрытия пластин; $H_\delta(\omega t)$ – напряженность магнитного поля над (под) зазором.

На рис.4 показана $I_0(\alpha)$ кривая тока XX и $I_0g1(\alpha)$, $I_0g3(\alpha)$, $I_0g5(\alpha)$ ее разложение на гармоники. Пунктиром $I_{\text{exp}}(\alpha)$, $I_{\text{exp}g1}(\alpha)$, $I_{\text{exp}g3}(\alpha)$, $I_{\text{exp}g5}(\alpha)$ показаны экспериментально полученные данные 1, 3, 5 гармоник, амплитудные зна-

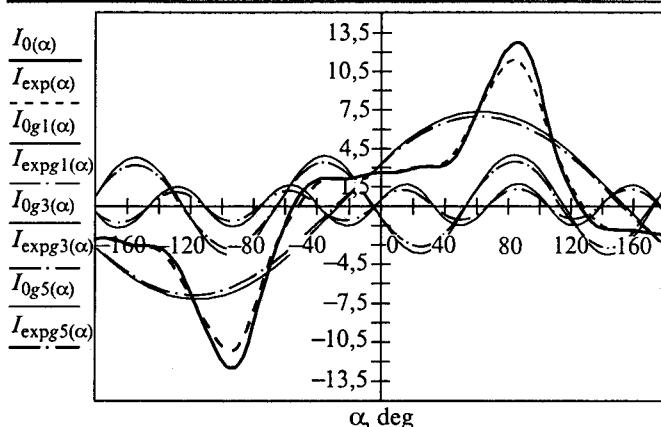


Рис.4. Гармонический состав тока XX

чения которых были измерены анализатором гармоник.

В заключение заметим, что потери XX могут быть рассчитаны по амплитуде первой гармоники тока, амплитуде напряжения и косинусу угла между векторами первой гармоники тока и вектором напряжения, которое на 90° опережает вектор потока. В настоящем примере $I_{0g1m} = 7,224 \text{ A}$, $U_m = 308,5 \text{ В}$, $\cos(\phi) = 0,438$.

Сравнительная таблица

Параметр	Расчет	Эксперимент
Ток XX, А	5,896	5,478
Потери XX, Вт	488,6	488

Технология получения необходимых характеристик стали и другие промежуточные расчеты не могут быть описаны в пределах одной данной статьи.

Выводы

1. С использованием закономерностей, характеризующих анизотропию электротехнической стали, изучалась напряженность магнитного поля в зоне косых стыков магнитных систем

трансформаторов. Предложены простые зависимости, которые связывают магнитные проницаемости двух сред с функциями углов между разнонаправленными векторами H , B и нормалью к границе раздела двух сред. Зависимость (5) использована при исследовании направления вектора H на границе воздух – сталь в нижней пластине.

2. Изучение напряженности поля в зоне стыков подтвердило, что для расчета тока XX необходимо иметь характеристики намагничивания стали заданной марки вдоль направления прокатки и под углом 45° к этому направлению.

3. Показана возможность расчета потерь XX при известном гармоническом составе тока XX.

Список литературы

1. Дорожко Л.И. Характеристики анизотропной стали под разными углами к направлению прокатки // Электричество. 1972. № 3.
2. Калинин Е.В., Любивый В.И., Дианова Н.Я. Исследования характеристик магнитной анизотропии трансформаторной электротехнической стали // Электрические машины: Межвузовский сборник. Чебоксары, 1982.
3. Mansel A. Jones, Anthony J. Moses and John B. Thompson flux distribution and power loss in the mitered overlap joint in power transformer cores // IEEE Transactions on Magnetics. 1973. Vol. Mag-9, No 2.
4. Молотилов Б.В., Миронов Л.В., Петренко А.Г. и др. Холоднокатаные электротехнические стали: Справочник. М.: Металлургия, 1989.
5. Пинтиюшин В.С. и др. Электротехника. М.: Высшая школа, 1976.

Иванченко Олесь Николаевич – старший научный сотрудник ОАО «ВИТ». Окончил физический факультет Харьковского политехнического института в 1953 г. В 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему "Теоретическое и экспериментальное уточнение расчетов витых цилиндрических пружин".

Эндик Виталий Александрович – инженер ОАО «ВИТ». Окончил электротехнический факультет Запорожского государственного технического университета в 2000 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ

Закон электромагнитной инерции Ленца и феноменальные принципы физики¹

СВЕНТИЦКИЙ И.И.

Методом логического анализа выявлена естественно-научная сущность эмпирического закона электромагнитной инерции. Показана ее общность с энергоэкономной сущностью феноменальных принципов, используемых в качестве исходных положений в основных разделах физики. Выявлены истоки решения долго не разрешавшейся проблемы физики, которая обусловлена распространением второго начала термодинамики на процессы и структуры самоорганизующейся природы.

On the basis of the method of logical analysis, the natural-since essence of the empiric electromagnetic inertia law has been discovered. Its conformity with the energy-efficient nature of the phenomenal principles, used as initial basic axioms in different sections of physics has been proved. The ways for solution of the physical problem originated from the attempts to extend the Second Thermodynamic Law over processes and structures of the living nature, that has not been solved for a long time, have been brought to light.

Цель настоящей работы – раскрыть естественно-научную сущность эмпирически установленного закона Ленца, показать ее общность с сущностью феноменальных принципов (Ле Шателье, Ферма, наименьшего действия), используемых в качестве исходных положений в теоретической физике. Закон (правило) электромагнитной инерции установлен Ленцем в 1883 г. Им определено направление индукционных токов. Одна из его формулировок [1, с.72]: "...в системе контуров с электрическими токами существует тенденция к сохранению неизменными магнитных потоков, сцепляющихся с отдельными контурами системы. При всякой попытке изменить потоки, сцепляющиеся с контурами, в контурах возникают электромагнитные силы, стремящиеся воспрепятствовать этому изменению". Для простейшего случая одного контура с током i возникает ЭДС самоиндукции e

$$e = -d(Li)/dt = -Ldi/dt, \quad (1)$$

где L – индуктивность контура.

В классической механике для случая движения свободной материальной точки (тела) принцип инерции состоит в том, что движущемуся свободному материальному телу свойственно сохранять свое количество движения. Если оно изменяется под действием внешних сил, то сила инерции, равная и противоположная внешним силам, будет препятствовать изменению количества движения. При совпадении направления внешней силы с направлением скорости тела v сила инерции f определится выражением:

$$f = -d(mv)/dt = -m(dv/dt), \quad (2)$$

где m – масса тела.

Из выражений (1) и (2) видна тождественность между индуктивностью и массой, током и скоростью, магнитным потоком и количеством движения. Закон электромагнитной инерции Ленца можно рассматривать как принцип минимизации перехода магнитной энергии в электрическую энергию и наоборот. В этом отношении он явно тождествен принципу наименьшего действия, которым определяется минимизация перехода в природных процессах потенциальной энергии в кинетическую энергию и наоборот.

В классическую механику этот принцип ввел Гамильтон в виде уравнения, получившего наименование гамильтониана. Важность этого события наиболее ярко и точно отражена в [2, с.40]: "Великое достижение классической динамики состоит в том, что ее законы удалось выразить через одну величину – гамильтониан". Гамильтониан H описывает сумму энергий системы – кинетической E_k , зависящей только от импульсов $P_1 \dots P_n$, и потенциальной E_n , зависящей только от координат $q_1 \dots q_n$:

$$H = E_k(P_1 \dots P_n) + E_n(q_1 \dots q_n). \quad (3)$$

Гамильтониан одновременно отображает закон сохранения энергии и наименьшее действие – минимизацию перехода одного вида энергии (потенциальной) в другой (кинетическую) при их взаимном преобразовании.

Принцип наименьшего действия открыл Мопертюи в 1740 г., а в 1744 г. математик Л. Эйлер преобразовал его в принцип экстремального действия. Это преобразование послужило началом развития вариационного исчисления как в физике, так и в математике. В энергетических терминах сущность принципа экстремального

¹ Печатается в порядке обсуждения.

действия в следующем: действия (процессы природы) могут быть как минимальными (энерго-экономными), так и максимальными (энергосточительными, не энергоэкономными).

В первоначальной формулировке сущность принципа наименьшего действия такова: из всех возможных траекторий перемещения материального тела из одной точки пространства в другую реализуется та, при которой произведение обобщенной силы на путь минимально.

Особая важность принципа наименьшего действия для теоретической физики выражена следующим положением, приведенным в [3, с.10]: "Наиболее общая формулировка закона движения механических систем дается так называемым **принципом наименьшего действия (или принципом Гамильтона)**".

В основные уравнения квантовой механики – уравнения Шредингера гамильтониан входит в виде оператора [4, с.72–73]. Исходное уравнение Шредингера не выведено, а подобрано. В качестве его основы использована волновая функция классической оптики (выводимая из принципа Ферма), в которую введен в виде оператора гамильтониан. Достоверность этого уравнения подтверждается результатами расчетов.

Основные уравнения квантовой электродинамики – уравнения Дирака и Паули – также содержат гамильтониан [5, с.150]: "Это – так называемое уравнение Паули. Оно отличается от нерелятивистского уравнения Шредингера наличием в гамильтониане последнего члена, который имеет вид потенциальной энергии магнитного диполя во внешнем поле...".

В основное уравнение еще не завершенной геометродинамики (ОТО) – уравнение Эйнштейна – Гамильтона – Якоби – также входит в неявном виде принцип наименьшего действия.

В статистическую механику уравнения Гамильтона ввел Д.В. Гиббс. В [6, с.351] он отметил: "Законы термодинамики, установленные эмпирически, выражают приблизительное и вероятное поведение системы... . Законы термодинамики легко получить из принципов статистической механики, неполным выражением которых они являются, ..." и далее [6, с.354] "Мы будем использовать гамильтонову форму уравнений движения системы".

Система электромагнитных уравнений Максвелла не содержит принципа наименьшего действия или ему подобных, но ее, как показано в [7, с.58], можно преобразовать в систему уравнений Гамильтона: "...так что электромагнитное поле является примером непрерывной гамиль-

тоновой системы". Подобная связь уравнений Максвелла и уравнений Гамильтона показана в учебнике классической механики, который, очевидно, не случайно назван "Основы гамильтоновой механики" [8].

Принципу наименьшего действия особо важное значение придавал А. Пуанкаре [9, с.107]: "Сама формулировка принципа наименьшего действия имеет в себе нечто, неприятно поражающее наш ум. При переходе от одной точки к другой материальная частица, не подверженная действию какой-либо силы, но подчиненная условию не сходить с некоторой поверхности, движется по геодезической линии, т.е. по кратчайшему пути. Эта частица как будто бы знает ту точку, куда ее желаю привести...". В работе, посвященной итогам развития математической физики, Пуанкаре, перечислив основные ее принципы (сохранения энергии, рассеяния энергии (или принцип Карно), сохранения массы, равенства действия и противодействия, принцип относительности), отмечал "Я добавил бы еще принцип наименьшего действия". Рассмотрев слабые стороны этих принципов, он приходит к выводу [9, с.318]: "Что же остается нетронутым среди всех этих руин? Принцип наименьшего действия стоит нерушимо до сих пор,... этот принцип надолго переживет все остальные; он действительно и самый неопределенный и самый общий".

Установив общие законы электромагнитного поля, Максвелл пришел к заключению, что оптическое излучение (свет) имеет электромагнитную природу. Все основные аналитические зависимости и законы оптики выводятся из феноменологического принципа Ферма, согласно которому свет, распространяясь из одной точки в другую, реализует траекторию, соответствующую наименьшему времени прохождения. Обосновывая этот принцип, Ферма "руководствовался телескопическими соображениями, согласно которым природа действует целенаправленно: она не может быть расточительной и должна достигать своих целей с наименьшей затратой средств" [10, с.47]. Принцип Ферма по своей сущности тождествен принципу наименьшего действия. В [11] показано, что его можно преобразовать в принцип экстремального действия.

По аналогии с законом электромагнитной инерции Ленца был обоснован принцип Ле Шателье или принцип "смещения равновесия" [12, с.392], широко используемый для определения направления смещения равновесия. Если систему, находящуюся в термодинамическом равно-

весии, внешнее воздействие выводит из состояния равновесия, то оно вызывает в системе процессы, направленные на ослабление эффекта этого воздействия. В случае нагревания равновесной системы в ней происходят изменения (например, химическая реакция) с поглощением теплоты, а при охлаждении – изменения с выделением теплоты. При увеличении внешнего давления смещение равновесия системы связано с уменьшением ее общего объема. Снижение внешнего давления наоборот сопровождается увеличением объема системы. Принцип Ле Шателье отображает приспособительную (адаптивную) реакцию природных самоорганизующихся систем к воздействиям внешней среды. Каждое действие внешней среды на систему вызывает в ней изменения, ослабляющие эффект этого действия. В процессах самоорганизации важная роль принадлежит явлению флюктуации. Вполне определенное направление смещения равновесия в соответствии с принципом Ле Шателье происходит на элементарном флюктуационном уровне (молекул, атомов и, вероятно, ядерных частиц).

Закон электромагнитной инерции Ленца и рассмотренные принципы, используемые в физике, объединяет определенная общность их сущности, которая до недавнего времени естественно-научно не объяснена. Их феноменальность (надежная эмпирическая обоснованность и отсутствие объяснения наукой) свидетельствует о существовании еще не открытых законов природы, общность которых равна или выше общепризнанных наиболее важных законов. Закон Ленца и принцип наименьшего действия явно отображают преобразования разных видов энергии. Принципы Ферма и наименьшего действия преобразуются в экстремальные принципы.

Главный энергопреобразующий закон энергетики и физики – второе начало термодинамики (ВНТД). С ним, очевидно, не случайно связана долго не разрешавшаяся проблема физики: проблема принципиальной несогласованности ВНТД с динамикой всей физики, доказанная теоретически в теореме Пуанкаре и подтвержденная Мисра (теорема Пуанкаре–Мисры) [2]. При рассмотрении этой проблемы И. Пригожин в [2] отмечает, что для согласования ВНТД с основными разделами физики, вероятно, придется их принципиально переработать. В чем естественно-научная причина несогласованности ВНТД с основными разделами физики и можно ли ее устраниить без принципиальной переработки последней?

Наиболее важный результат развития науки в XX столетии – создание неравновесной термодинамики (синергетика, физика самоорганизации). В соответствии с этой отраслью науки природу делят на две принципиально различающиеся части: самоорганизующуюся (неравновесную) и не самоорганизующуюся (равновесную). Такое деление не менее важно, чем традиционное – на живую и не живую. Физико-химические самоорганизующиеся системы по своим важным свойствам (например, энергетическим) более близки к живым, чем к не самоорганизующимся (равновесным) физико-химическим. Это – одно из важнейших исходных положений в решении рассматриваемых проблем. Физика (за исключением физики хаоса и термодинамики) изучает самоорганизующиеся физико-химические структуры и процессы. Как отмечено выше, исходными положениями основных разделов физики являются феноменальные принципы: наименьшего действия, Ферма и др.

ВНТД выведено на основе результатов анализа модели тепловой машины, устройства созданного человеком и не относящегося к самоорганизующейся природе. Распространение ВНТД на самоорганизующуюся природу, очевидно, неправомочно. Это подтверждается многочисленными безуспешными попытками ученых, в том числе и выдающихся, объяснить процессы и структуры самоорганизующейся живой природы на основе ВНТД. Закон Ленца и феноменальные принципы, выполняющие роль исходных положений в основных разделах физики, по своей сущности противоположны ВНТД. В этом естественно-научное объяснение (подтверждение) теоремы Пуанкаре–Мисры и одновременно исток решения проблемы принципиальной несогласованности ВНТД с динамикой основных разделов физики.

ВНТД выполняет важную роль в развитии традиционных (градиентных) преобразований энергии. В то же время, необоснованное распространение его на самоорганизующуюся природу налагает своеобразное ограничение на использование нетрадиционных преобразований энергии, основанных на применении самоорганизующихся структур и процессов. Например, теоретически и экспериментально доказана возможность преобразования теплоты окружающего воздуха в электроэнергию нелинейным конденсатором с КПД до 0,35 [13]. В соответствии с ВНТД этого быть не может, так как такой преобразователь подобен "вечному двигателю второго рода". Подобных примеров много. Как раз-

решить это принципиальное затруднение?

Автор обосновал (в виде рабочей гипотезы) общую энергоэкономную направленность структур и функций самоорганизующихся систем. Она названа законом выживания [14]. Сущность его противоположна сущности ВНТД и состоит в следующем: каждый элемент самоорганизующейся природы в своем развитии (индивидуальном, эволюционном) самопроизвольно устремлен к состоянию наиболее полного (эффективного) использования доступной свободной энергии системой трофического (питательного) уровня, в которую он входит.

Успешно проведена косвенная экспериментальная проверка закона выживания на примере разработки энергоэкономных электрических ламп для облучения растений с целью обеспечения фотосинтеза [14].

Достоверность закона выживания подтверждена использованием его для естественно-научного объяснения феноменальных явлений: золотого сечения; структур и процессов, описываемых фрактальными зависимостями, солитонов и др. Рассмотренные феномены оказались природными механизмами энергоэкономности – механизмами проявления закона выживания [14]. Закон электромагнитной инерции Ленца и феноменальные принципы физики также можно рассматривать как природные механизмы энергоэкономности. Эта общая их сущность может быть объединена законом выживания. Аналитическое выражение этого закона подобно выражению ВНТД, но противоположно по знаку [14].

Автор сознательно не использовал в этой работе математический анализ из-за опасения возможной ошибочности, подобной трактовке результатов, полученных Л. Больцманом при аналитическом выводе статистического определения энтропии. Как известно, Больцман доказал знаменитую Н-теорему, из которой была получена загадочная Н-функция. Она была подобна ожидавшейся формуле статистического определения энтропии, но в правой части содержала отрицательный знак. Возникла дискуссия по этим результатам, в которой Больцмана обвинили в не корректном использовании математического анализа. После его трагической кончины, без объяснений отрицательный знак был исключен из Н-функции и она получила общеизвестное название формулы Больцмана:

$$S = k \lg W, \quad (4)$$

где S – энтропия; k – постоянная Больцмана; W – статистическая вероятность.

Загадочность Н-функции оставалась не объясненной до недавнего времени. Наличие отрицательного знака в правой части Н-функции свидетельствовало о корректном использовании Л. Больцманом математического анализа. Причина появления этого знака в следующем [14]: при выводе статистического определения энтропии Больцман в качестве исходных использовал положения классической механики, в числе которых был гамильтониан [2]. В то время не было известно, что по своей сущности гамильтониан, отображающий принцип наименьшего действия, противоположен сущности ВНТД. Заложенная на входе в математический анализ сущность гамильтониана проявилась в виде отрицательного знака в результатах этого анализа.

Отрицательный знак в правой части Н-функции Больцмана отображает реальную действительность того, что энтропия самоорганизующихся структур и процессов, изучаемых основными разделами физики, не возрастает, а уменьшается. «Исправленная» Н-функция – формула Больцмана (4) – отражает реальность возрастаания энтропии в не самоорганизующихся (равновесных) системах. К сожалению, длительное время это не было осознано. ВНТД и формулу (4) необоснованно распространяли на самоорганизующуюся (не равновесную) часть природы, которую можно объяснить законом, противоположным по сущности ВНТД, – законом выживания, объединяющим и объясняющим феноменальные принципы физики и закон электромагнитной инерции Ленца.

Неопровергнутое подтверждение этого положения содержится в основных разделах физики, главные динамические уравнения которых содержат принципы наименьшего действия и Ферма, сущность которых противоположна ВНТД. Это подтверждают также результаты современных теоретических исследований по синергетике электромагнитных солитонов вакуума, в которых нетривиально развивается система уравнений электромагнитного поля Максвелла [15].

Признание этих положений снимает негласный запрет ВНТД на развитие нетрадиционных преобразователей энергии, основанных на использовании самоорганизующихся структур и процессов. Характерные примеры таких преобразователей – использование солитонов (атмосферных, гидравлических, электромагнитных), уже упоминавшейся нелинейной емкости в качестве преобразователя тепловой энергии среды в электрическую энергию [13].

Признание ограничения приложения ВНТД

только к несамоорганизующимся (равновесным) системам, а закона выживания к самоорганизующимся (не равновесным) системам позволяет решить долго не разрешавшуюся проблему "вопиющего" [2] противоречия между эволюцией природы по ВНТД (в направлении разрушения структур, деградации энергии, роста энтропии) и диаметрально противоположной эволюционной направленностью живой природы в соответствии с теорией биологической эволюции (к развитию и совершенствованию структур и процессов организмов и их сообществ).

Список литературы

1. Нейман Л.П., Демирчян Н.С. Теоретические основы электротехники. Т.1. М. -Л.: Энергия, 1966.
2. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.1. Механика. М.: Наука, 1965.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.III. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Физматгиз, 1963.
5. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика. Т.IV. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1980.

6. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая физика. М.: Наука, 1982.

7. Колокольчиков В.В. Гамильтоновы системы и релятивизмы. М.: Изд. МГУ, 1996.

8. Хаар Д.тер. Основы гамильтоновой механики. М.: Наука, 1974.

9. Пуанкаре А. О науке. М.: Наука, 1990.

10. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1980.

11. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Гиз. Технико-теоретической литературы, 1957.

12. БЭС. Т.14. Ленца правило. М., 1973.

13. Заев Н.Е., Спиридонов Ю.С. Емкость – конвертор тепла среды в электроэнергию // Электротехника. 1998. № 12. С.53–55.

14 Свентицкий И.И. Принципы энергосбережения в АПК. Естественно-научная методология. М.: ВИЭСХ, 2001.

15. Смелов М.В. Синергетика электромагнитных солитонов вакуума // Синергетика. М.: МГУ. 2001. Т.4. С.130–152.

Свентицкий Иван Иосифович – профессор международной кафедры ЮНЕСКО по возобновляемой энергетике ГНУ "Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ)". Окончил факультет электрификации Ленинградского института механизации и электрификации сельского хозяйства (ЛИМЭСХ) в 1954 г. Защищил докторскую диссертацию по теме "Энергетические основы использования оптического излучения в растениеводстве" в 1993 г.

Взаимное влияние электромагнитных и механических переходных процессов в асинхронных вибродвигателях

АЛИМХОДЖАЕВ К.Т.

Предложена методика определения аналитических зависимостей динамических моментов сопротивления вибромашин, которые отличаются от моментов сопротивлений типовых нагрузок тем, что имеют экстремальный характер изменения в зависимости от частоты вращения (вибрации рабочего органа). Разработана математическая модель асинхронного дебалансного вибродвигателя, позволяющая определить степень взаимного влияния электромагнитных и механических переходных процессов при пуске двигателя.

Прямой пуск асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором при фиксированных значениях частоты и напряжения исследован подробно в трудах многих ученых. При этом рассматривались пусковые режимы на ХХ [1, 2] или с постоянной нагрузкой [3, 4]. В двигателях с типовыми нагрузками при исследовании динамики принято оперировать со статическим моментом сопротивления (M_c) механизма и статической механической характеристикой двигателя. Не учитывается взаимное влияние электромагнитных и механических переходных процессов АД.

В резонансных асинхронных дебалансных вибродвигателях (АДВД) M_c существенно отли-

чается от M_c типовых нагрузок и является неоднозначной резонансной функцией частоты вращения ротора (частоты вибрации рабочего органа) ω . Кроме того, динамические моменты сопротивления вибромашин (ВМ) существенно отличаются от статических. Отсутствие в исследованиях учета взаимного влияния динамического момента сопротивления $M_c(t)$ рабочего механизма и динамического электромагнитного момента АД $M(t)$ привело к тому, что до настоящего времени не разработан метод обоснованного выбора мощности АД ВМ.

Целью настоящей работы является определение аналитических зависимостей динамических моментов сопротивления ВМ, разработка мате-

матической модели АДВД и исследование взаимного влияния электромагнитных и механических переходных процессов пуска в ход резонансных АДВД на математической модели и экспериментальной установке.

I. Предлагается методика определения аналитических зависимостей динамических моментов сопротивления $M_c(t)$ ВМ. Для этого определяется решение нелинейного дифференциального уравнения движения рабочего органа (РО) ВМ:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\rho}{m} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m} F(t) \sin \omega t, \quad (1)$$

где $\rho = \rho(A, \omega)$, $\omega_0 = \Omega(A, \omega)$ – нелинейные параметры; $F(t)$ – переменная амплитуда вибровозбуждающей силы; m – масса РО с вибрируемым грузом; x – координата перемещения РО; A , ω – амплитуда и угловая частота вибрации РО.

В нелинейном дифференциальном уравнении (1) при прямом пуске АДВД $F(t)$ является непрерывно возрастающей функцией времени t . Пренебрегая тангенциальной составляющей силы инерции дебалансов, получаем: $F(t) = N\varepsilon^2 t^2$, где N – коэффициент пропорциональности; $\varepsilon = d\omega/dt$ – угловое ускорение ротора. С учетом фильтрующих свойств ВМ считаем, что в резонансном и околорезонансном режимах АДВД переменная x является гармонической функцией. Тогда в (1) введем комплексную переменную φ ($x = \operatorname{Re} \varphi$), удовлетворяющую дифференциальному уравнению

$$\frac{d\varphi^2}{dt^2} + \frac{\rho}{m} \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi = F_1(t) e^{-j\theta(t)}, \quad (2)$$

где $\theta(t) = \varepsilon t/2$; $F_1(t) = (1/m)F(t)$.

Приближенное решение нелинейного дифференциального уравнения (2) с переменной правой частью можно получить, использовав метод вариации произвольных постоянных и интеграл вероятностей комплексного аргумента при нулевых начальных условиях $\dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}(0) = \varphi(0) = 0$ и $\varphi(t) = A(t) e^{-j[\theta(t)+j]}$, где

$$A(t) = \frac{(j+1)F(t)}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\sigma} [W(u) + W(v) - W(u) \times \times e^{-(u_0^2 - u^2)} - W(v) e^{-(v_0^2 - v^2)}]} \quad (3)$$

– динамическая амплитуда колебаний РО ВМ при пуске;

$$v = \frac{j-1}{2\sqrt{\sigma}} (\varepsilon t + h + j \frac{\rho}{2}); \quad u = \frac{1-j}{2\sqrt{\sigma}} (\varepsilon t - h + j \frac{\rho}{2});$$

$$h = \sqrt{\omega_0^2 - \rho^2/4};$$

u_0 и v_0 – значения u и v при $t = 0$; $\sigma = \alpha + \varepsilon$; α – постоянная; $W(u)$ и $W(v)$ определяются представлением u и v вместо y в табулированной функции

$$W(y) = e^{-y^2} \left(1 + \frac{2j}{\sqrt{\pi}} \right) \int_0^y e^{y^2} dy.$$

Выделив действительную часть в соответствии с $x = \operatorname{Re} \varphi$, можно найти решение (1)

$$x(t) = |A(t)| \cos [\theta(t) + \psi(t)],$$

где $\psi(t) = -\operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} A(t)}{\operatorname{Re} A(t)}$; $\operatorname{Re} A(t)$ и $\operatorname{Im} A(t)$ – действительная и мнимая части $A(t)$.

Если в аналитическом выражении статического момента сопротивления M_c вместо амплитуды установившихся колебаний РО подставить $A(t)$ из (3), получим аналитическую зависимость динамического момента сопротивления $M_c(t)$ ВМ в предположении, что составляющие начального момента сопротивления $M_{c,\text{нач}}$ и вентиляторной составляющей $M_{c,\text{вен}}$ в динамике не отличаются от статических значений:

$$M_c = M_{c,\text{нач}} + M_{c,\text{вен}} + \frac{m_0 A(t) \omega}{\sqrt{[\omega_0^2 - \omega^2] + [(\rho/m)\omega]^2}}. \quad (4)$$

Из (4) и (3) следует, что если третья составляющая статической механической характеристики $M_c(\omega)$ ВМ достигает максимального значения при $\omega = \omega_0$ (кривая 1 на рис.1), то динамические механические характеристики имеют максимум момента $M_c(t)_{\text{max}}$, уменьшающиеся и смещающиеся вправо или влево в зависимости от знака и ε . Частота вибраций РО, которой соответствует $M_c(t)_{\text{max}}$, определяется

$$\omega_M = \Omega(A, \omega) \pm \frac{2,171 \sqrt{|\varepsilon|}}{[1 + 0,149(\rho/m)\sqrt{|\varepsilon|}]^2 [\Omega^2(A, \omega) - (\rho/m)^2]}. \quad (5)$$

Знак "+" и "-" в (5) соответствуют положительное или отрицательное значение ε . Подставляя значения ε в (4), можно получить значения $M_{ci}(t)_{\text{max}}$ ВМ (где $i = 2, 3, 4, 5$). На рис.1 $\varepsilon_2 < \varepsilon_3 < \varepsilon_4 < \varepsilon_5$ – ускорения ротора (с положительными знаками) для кривых 2–5, которые построены по (3), (4) и (5).

Для сравнения полученных аналитических зависимостей (3)–(5) с точным решением проводилось численное интегрирование на ПЭВМ нелинейных дифференциальных уравнений (1) и (4). Апроксимация нелинейностей уравнения (1) проводилась с использованием эксперимен-

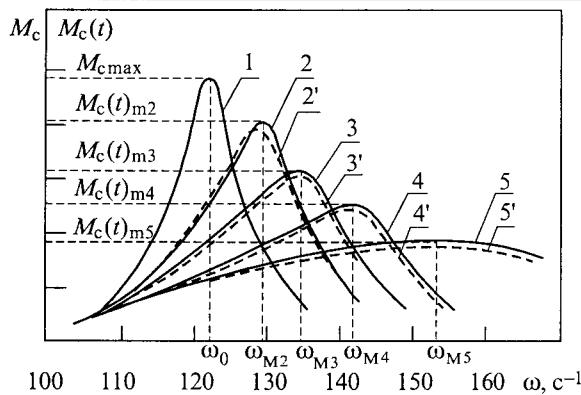


Рис.1. Динамические механические характеристики ВМ при $\omega = \text{const}$

тальных данных АДВД виброплощадки серии СМ-457У. Расхождения найденных аналитических выражений (кривые 2–5 на рис.1) от точно-го численного решения (кривые 2'–5') не превышают 5–7%.

Экспериментальная проверка приемлемости полученных аналитических выражений и точных решений связана с некоторыми трудностями. Они заключаются в том, что, во-первых, нет возможности отдельно измерить вибрационную (третью) составляющую динамического момента сопротивления ВМ в (4), отделив ее от результирующей $M_c(t)$. Во-вторых, в реальных АД ускорение ротора не является постоянной величиной на всем протяжении переходного процесса. Поэтому для учета этих факторов в начале проводились опыты на упомянутой виброплощадке с асинхронным короткозамкнутым двигателем серии 4А 180М, 15 кВт, 1500 об/мин. В частности, проводились исследования изменения полного динамического момента сопротивления при прямом пуске в ход нагруженного АДВД.

Для обеспечения при пуске полного прохождения ВМ через резонанс и при различных значениях ускорений ротора частота ω_0 была установлена равной 70 и 85% синхронной частоты вращения ω_1 , а напряжение АД устанавливалось $u_1 = u_{1H}$ и $u_1 = 0,8 u_{1H}$. По данным опытов строились динамические механические характеристики ВМ (сплошные линии на рис.2).

Затем по данным экспериментов определялась зависимость $\varepsilon(t)$, которая подставлялась в аналитические выражения (3)–(5). Полученные расчетные механические характеристики (пунктирные линии на рис.2) не отличаются от экспериментальных более чем на 10–12%.

II. При исследовании переходных процессов пуска АД с типовыми нагрузками считается, что длительность электромагнитных переходных

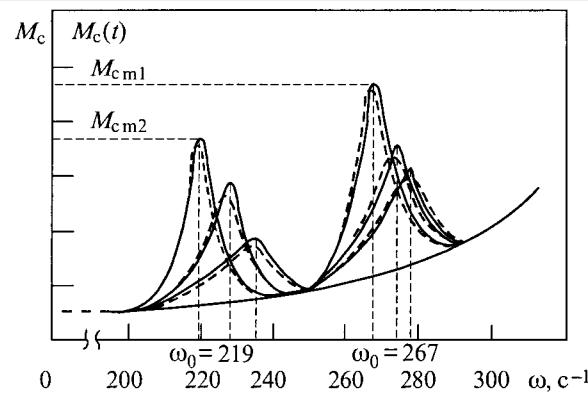


Рис.2. Динамические механические характеристики ВМ, построенные по данным расчетов на ЭВМ и экспериментов

процессов составляет несколько периодов питающего напряжения, в течение которых ротор не успевает набрать существенную частоту вращения, а иногда даже не успевает тронуться с места [1]. Такой вывод позволил упростить аналитические выражения и не учитывать в расчетах переходных процессов пуска влияние изменения скольжения s . Такое упрощение в АДВД приводит к существенным погрешностям, так как $M_c(t)$ является неоднозначной функцией многих переменных [(4), (5)].

В работе предлагается использовать разработанную математическую модель АДВД с существенно нелинейными уравнениями в предположении, что АД является идеализированным и все обмотки статора включаются в сеть одновременно в тот момент времени, когда хотя бы одно из фазных напряжений проходит через нуль. Математическая модель включает в себя уравнения движения РО ВМ (1), динамического момента сопротивления ВМ (4), нелинейные уравнения напряжений статора, ротора и равновесия моментов

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + \frac{d \Psi_1}{dt} + \omega_1 \Psi_1; \\ 0 &= i_2 r_2 + \frac{d \Psi_2}{dt} + (\omega_1 - \omega) \Psi_2; \\ M(t) &= p_n L_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}); \\ \frac{d\omega}{dt} &= [M(t) - M_c(t)] p_n / J, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где i_1 , i_2 , Ψ_1 , Ψ_2 , r_1 и r_2 – токи, потокосцепления и активные сопротивления обмоток статора и ротора; ω – угловая частота вращения поля; p_n – число пар полюсов; J – момент инерции вращающихся частей АД и ВМ.

Известно, что электромагнитные переходные

процессы, а следовательно, и пульсация $M(t)$ при пуске АДВД, возникают вследствие взаимодействия токов основной гармоники с постоянной составляющей потокосцепления Ψ_q , неизменной в пространстве и во времени. Так как в (6) учитываем изменение значения s , то общепринятая электромагнитная постоянная времени

$$T_3(s) = (L_1 + L_2) / (r_1 + r_2/s), \quad (7)$$

(L_1 и L_2 – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора) теряет свой смысл, заложенный первоначально, как постоянный параметр и становится функцией s . Так как использование в расчетах $T_3(s)$ приводит к усложнению задач, в дальнейшем принимаем T_3 – длительность электромагнитного переходного процесса (с) от начала включения обмоток статора в сеть до достижения установившегося потокосцепления или до гашения пульсации $M(t)$.

Исследования показали, что значения T_3 из (7), следовательно и T_n , будут наибольшими при неподвижном роторе. В режиме ХХ АД T_3 и T_n – минимальны. Эти явления объясняются следующими физическими процессами: если ротор неподвижен, то Ψ_q не наводит в обмотках ротора ЭДС и токи, т.е. нет взаимодействия Ψ_q с этими токами, следовательно, затухание Ψ_q затягивается, и наоборот, чем быстрее ротор набирает обороты, тем быстрее и больше наводятся в обмотке ротора ЭДС и токи, тем больше их взаимодействие, тем быстрее затухает Ψ_q .

Это подтверждается осциллограммой решения математической модели для АДВД (рис.3). На рис.3,а – неподвижный ротор, $T_n = 0,64$ с; на рис.3,б – режим ХХ, $T_n = 0,12$ с. При $M_c = \text{const}$ $T_n = 0,12 \div 0,64$ с.

Исследования математической модели показали, что при наличии в составе $M_c(t)$ второй и третьей составляющих (4) кривые электромагнитных и механических переходных процессов существенно не отличаются от кривых в режиме ХХ. При наличии в составе (4) первой составляющей T_n приближается к значению, которое наблюдается при $M_c = \text{const}$, т.е. растет по сравнению с ХХ. Для одних и тех же ВМ при различных значениях масс вращающихся частей (вместе с массой добалансов) T_n будут различными.

Таким образом, установлено, что длительность протекания электромагнитных переходных процессов, следовательно длительность пульсации электромагнитного момента, в двигателях с типовой нагрузкой зависит от $M_c = \text{const}$, а в АДВД – от составляющей $M_{c,\text{нач}}$. В свою очередь, пульсация электромагнитного мо-

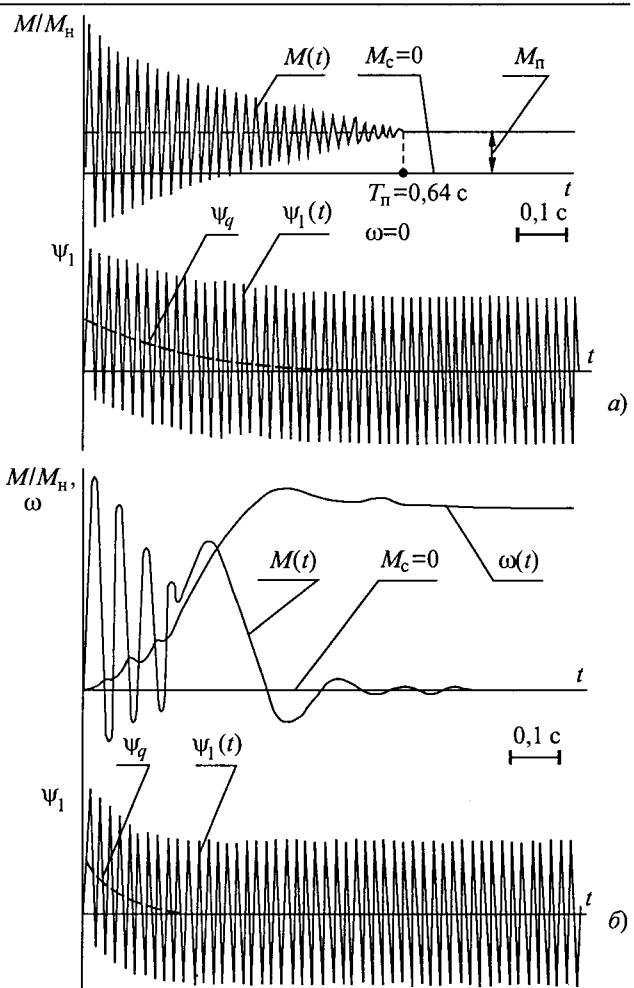


Рис.3. Осциллограммы решений математической модели АДВД

мента не влияет на длительность механических переходных процессов при типовых нагрузках, в частности при $M_c = \text{const}$, но в АДВД она оказывает влияние на длительность, характер механических переходных процессов и исход успешного завершения пускового процесса.

Наиболее тяжелый пуск АДВД будет наблюдаться, когда $M_c(t)_{\text{max}} > M$, и ω_0 вибромашины будет находиться в участке AB и CD (рис.4) с наибольшей пульсацией $M(t)$ (M – текущее значение статического электромагнитного момента). При этом, в зависимости от ε пуск может иметь следующие особенности (рис.4):

1) ускорение ротора достаточно большое ($M_c(t)_{\text{max}} < M$), ротор АД "проскаивает" участок с пульсацией (AB и CD), процесс пуска завершается благополучно;

2) ротор не набрал достаточно большое ускорение ($M_c(t)_{\text{max}} > M$), ротор не успевает "проскочить" участок с наибольшей пульсацией AB и застrevает на низких частотах вращения (на-

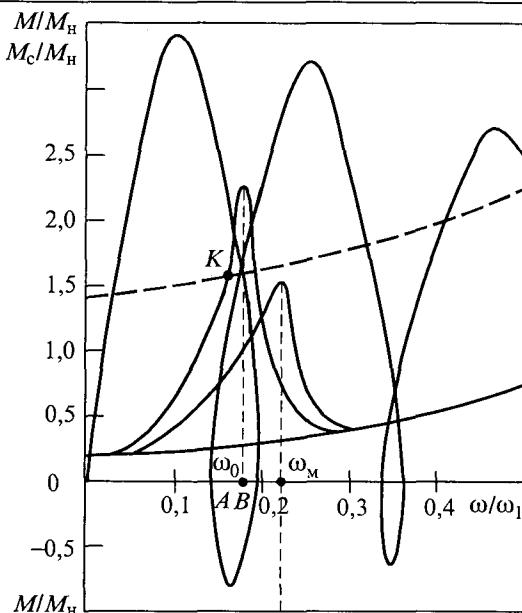


Рис.4. Динамические механические характеристики АДВД при пуске

блюдается установившийся режим в точке K на рис.4), пуск неблагополучный.

Для количественной и качественной оценки расчетных статических и динамических механических характеристик, снятых с помощью математической модели АДВД, проводились экспериментальные исследования. На рис.5 приведена осциллограмма неблагополучного пуска АДВД.

Величину, пропорциональную динамическому моменту сопротивления ВМ (производственного механизма), определяли путем алгебраического сложения величин, пропорциональных динамическому электромагнитному моменту и ускорению ротора АД.

Измерение динамического электромагнитного момента проводилось путем алгебраического перемножения мгновенных значений тока статора и магнитного потока двигателя. Измерение ускорения ротора проводилось с помощью акселерометра [3].

Выводы

1. Выведенные аналитические зависимости динамических моментов сопротивления ВМ по-

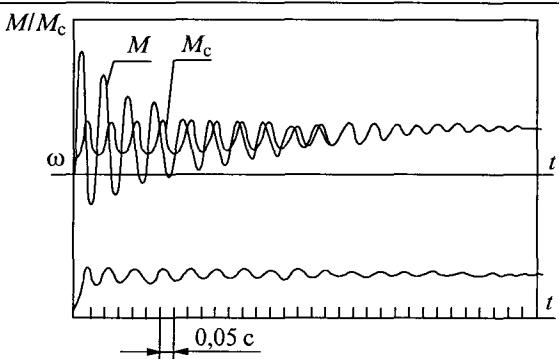


Рис.5. Экспериментальная осциллограмма неблагоприятного пуска АДВД

казали, что они имеют свойства уменьшать максимум $M_c(t)_{\max}$ и увеличивать частоту свободных колебаний РО ω_m при различных положительных значениях ускорения ротора и наоборот – уменьшать ω_m при отрицательной ϵ .

2. Разработанная математическая модель АДВД показала, что длительность электромагнитных переходных процессов АД помимо общеизвестных величин зависит от длительности разгона ротора двигателя и от начального момента сопротивления $M_{c,\text{ нач}}$ вибромашины, оказывая влияние на благополучный исход пускового процесса вибромашины.

3. Экспериментальные исследования АДВД подтвердили достоверность полученных теоретических положений.

Список литературы

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
2. Соколов М.М., Петров Л.П., Масандилов Л.Б., Ладензон В.А. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. М.: Энергия, 1967.
3. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974.

Алимходжаев Камалиддин Тиллаходжаевич – главный специалист Управления перспектив развития энергетики, внедрения новой техники и технологии ГАК "Узбекэнерго". Окончил энергетический факультет Ташкентского ГТУ им. Абу Райхана Беруний в 1968 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка и исследование частотно-управляемых электромагнитных вибровозбудителей" в 1981 г.

Определение гамма-процентного ресурса контактных соединений по данным тепловизионной диагностики¹

ВЛАСОВ А.Б.

Показано, что выполнение требований различных ГОСТ в части определения параметров надежности и гамма-процентных ресурсов позволяет в полной мере решать задачи технической диагностики ("диагноза" и "прогноза") при исследовании контактных соединений электрического оборудования 110–330 кВ. На примере данных тепловизионного контроля контактных соединений различных предприятий энергетической системы "Коленерго" в течение 1989–2002 гг. показаны методы расчета показателей надежности: потока отказов и вероятности безотказной работы, а также рассчитаны гамма-процентные показатели надежности контактных соединений, требуемые ГОСТами. Данные показатели необходимы для расчета сроков планового ремонта и тепловизионных обследований.

Методы тепловизионного обследования, особенности обработки "данных тепловизионного контроля контактных соединений для решения задач диагноза и прогноза описаны в [1–6]. Разработанная методика позволяет рассчитать показатели эксплуатационной надежности контактных соединений, их изменение со временем, сравнить данные по различным предприятиям. Применение метода экспертно-факторного анализа позволило выделить наиболее существенные факторы, влияющие на показатели надежности. Анализ показывает, что значительную роль в образовании дефектов контактных соединений играют перенапряжения, возникающие за счет грозовых явлений, происходящих непосредственно вблизи объектов.

В целом, обеспечение, определение и контроль надежности осуществляется *программой обеспечения надежности* – документом, устанавливающим комплекс взаимосвязанных организационно-технических требований и мероприятий, подлежащих проведению на определенных стадиях жизненного цикла объекта и направленных на обеспечение заданных требований к надежности и (или) повышение надежности (курсивом выделены термины ГОСТ).

Согласно требованиям ГОСТ 20911-89 *техническое диагностирование* предназначено для решения двух важнейших задач, первая из которых связана с установлением *технического диагноза*, вторая направлена на достижение цели – *прогнозирования технического состояния* контроля. В "задачу диагноза" входит: а) поиск места неисправности; б) определение причин отказа; в)

It is shown that performing the requirements of different standards in a part of determining the parameters of reliability and gamma-percentile life allows to solve the problems of the technical diagnostics ("diagnosist" and "forecast") at study of contacts for electric equipment 110–330 kV. On example of data of thermovision control of the contacts on energy system "Kolenergo" during 1989–2002 methods of calculation of reliability indices, as well as gamma-percentile life factors of contacts, required by standards are shown.

контроль технического состояния. Технический диагноз является конечным результатом контроля технического состояния – проверки соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из видов технического состояния на данный момент времени.

Решение "задачи прогноза" служит для *прогнозирования технического состояния* – определения технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени. Целью прогнозирования технического состояния может быть определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное состояние объекта.

Если рассматривать *тепловизионный контроль* как профилактическую меру поддержания работоспособности оборудования (осмотр), применяя к нему требования стандарта ГОСТ 23483-79, то от данного вида диагностического мероприятия не следует "требовать" решения всех диагностических задач, ограничившись решением первой из них.

Но, по мнению автора, есть необходимость и предпосылки для разработки метода "тепловизионной диагностики", решающего все *задачи технического диагностирования* в полной мере.

Например, ГОСТ 10434-82 описывает различные классы (3 класса) электрических контактных соединений (далее – контактные соединения), определяет требования по электрическому сопротивлению контактных соединений, а также *критерии предельных состояний* – тепловые режимы в предельном состоянии: при протекании номинального (длительно-допустимого) тока

¹ Печатается в порядке обсуждения.

наибольшая допустимая температура контактных соединений классов 1 и 2 не должна превышать значений, указанных в ГОСТ, или разность температур контактного соединения и проводника не должна превышать: 0°C – для контактных соединений классов 1 и 2, 35°C – для класса 3.

В ГОСТ 10432-82 особо выделяются требования к надежности: для оценки надежности контактных соединений устанавливается *гамма-процентный ресурс*, нижнее значение которого должно обеспечить работу электротехнических устройств в соответствии с требованиями к надежности, установленными стандартами или техническими условиями на эти электротехнические устройства.

Анализ требований ГОСТ 10432-82 показывает: любое превышение температуры контактного соединения и проводника должно считаться отступлением от *исправного состояния*, и, следовательно, одним из видов отказа; оценка надежности должна проводиться на основе статистического анализа и определения гамма-процентного ресурса.

Заметим, что ряд активно использующихся в научно-технической литературе по тепловизионному контролю и диагностике энергетического оборудования терминов и определений в существующих ГОСТ отсутствует. Терминология и требования ГОСТ практически не учитываются при анализе результатов тепловизионного контроля, проводимого на предприятиях, по разным причинам [6]. Традиционно используются так называемые практические критерии определения дефектов контактных соединений, например, дефект "в самой ранней" или "на начальной стадии развития", "сильно развитый" дефект, "в аварийной стадии", "развившийся", "аварийный" дефекты и т.п.

Подобное отступление от терминологии и понятий, определяемых ГОСТ, по нашему мнению, не только недопустимо, но в большинстве случаев приводит к значительным сложностям при сравнении данных различных авторов и затруднении экспертной оценки.

Современные методики тепловизионного контроля, накопления и обработки данных не позволяют приступить к решению второй задачи тепловизионной диагностики как метода технической диагностики – задачи прогноза для выявления параметров надежности и, как требуют ГОСТ 10432-82, 27.002-89, установления значений гамма-процентного ресурса.

Рассмотрим методику определения гамма-процентного ресурса контактных соединений на основе данных тепловизионной диагностики многолетних тепловизионных испытаний 110–26

330 кВ оборудования в 1989–2002 гг. энергосистемы АО "Колэнерго".

Согласно ГОСТ 27.002-89 объект может находиться в *исправном, неисправном, работоспособном и неработоспособном состояниях*. В частности, *неработоспособное состояние* – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической или проектно-конструкторской документации. Иногда используется термин "*частично-неработоспособное*" состояние, при котором объект способен частично выполнять требуемые функции. *Отказом* называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Различаются виды отказов в зависимости от *критерия отказа* (признака или совокупности признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и (или) конструкторской документации), причин, последствий и критичности отказа. К отказам относятся: *ресурсный, независимый и зависимый, внезапный и постепенный, сбой, перемежающийся, явный, скрытый, конструктивный, производственный, эксплуатационный, деградационный*. ГОСТ определяет *временные понятия, понятия показателей надежности, безотказности, долговечности, ремонтопригодности, сохраняемости, комплексные показатели надежности*.

Применяя данные определения к проблеме тепловизионной диагностики контактных соединений, в соответствии с ГОСТ 10432-82 можно считать, что любое превышение температуры контактного соединения следует считать как проявление дефекта, обусловливающего неработоспособное или точнее частично-неработоспособное состояние объекта. Данное заключение подтверждается требованиями ГОСТ 15467-79, согласно которому *дефектом* является каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям. Согласно ГОСТ 15467-79 дефекты подразделяются на: *явные, скрытые, критические, значительные и малозначительные, устранимые и неустранимые*.

В процессе физико-химического старения *дефекта* объект может достигнуть *пределного состояния*, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его *работоспособного состояния* невозможно или нецелесообразно.

Естественно, что в энергетике подобная аварийная ситуация недопустима, и именно поэтому актуальным является не только выявление дефектов на "ранней стадии их развития" (задача "диагноза" технической диагностики), но и рас-

чет показателей надежности (задача "прогноза").

Дефекты развиваются за определенное время в соответствии с физико-химическими закономерностями их старения, поэтому необходимо учитывать их *ресурс* – наработку (время) от начала эксплуатации или ее возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния. Для определения *ресурса* необходимо получить зависимость изменения *технического состояния* во времени и установить признак или критерий, характеризующий *предельное состояние*. В связи с этим ресурс можно определить по моменту времени, когда техническое состояние, постепенно ухудшаясь, совпадет с предельным состоянием.

Согласно ГОСТ 27.002-89 *гамма-процентная наработка до отказа* t_γ (показатель безотказности) – это наработка (время), в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах. *Средняя наработка до отказа* определяется как математическое ожидание наработки объекта до первого отказа, а *средняя наработка на отказ* определяется как отношение суммарной наработки восстановливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Показатель долговечности – *гамма-процентный ресурс* – характеризует суммарную наработку, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. Иногда величину γ называют вероятностью недостижения предельного состояния.

На практике *гамма-процентная наработка до отказа* t_γ рассчитывается с учетом известных значений *интенсивности и потока отказов*, связанных с параметрами эксплуатационными показателями *надежности и безотказности*, в том числе *вероятностью безотказной работы* – вероятностью того, что в пределах заданной вероятности отказ объекта не произойдет.

Наряду с понятием *вероятность безотказной работы* часто применяется понятие *вероятность отказа*, которое определяет вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение времени заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени. Методика определения точечных статистических оценок вероятности безотказной работы R^* и вероятности отказа Q^* описаны в [1–4].

ГОСТ 27002-89 дает методику определения гамма-процентной наработки до отказа, которую применительно к тепловизионной диагностике можно описать следующим образом. В процессе эксплуатации регулярно (ежегодно) проводятся тепловизионные испытания контактных соединений и определяются точечные статисти-

ческие оценки R^* и Q^* . На основании многолетних испытаний методами статистического анализа определяется аналитический вид зависимостей $R^*(t)$ и $Q^*(t)$ с заданной доверительной вероятностью.

Гамма-процентная наработка до отказа, гамма-процентный ресурс и другие аналогичные показатели определяются как корни t_γ уравнения $F(t_\gamma) = 1 - \gamma/100$, где $F(t)$ – функция распределения наработки до отказа (ресурса, срока службы). В частности, *гамма-процентную наработку до отказа* определяют из уравнения $R(t_\gamma) = \gamma/100$.

Эксплуатационные гамма-процентные показатели могут быть определены экспериментально на основе аппроксимации эмпирических функций соответствующими аналитическими распределениями.

Расчеты показывают [2], что среднее значение R_{cp} для дефектов контактных соединений всего высоковольтного оборудования лежит в диапазоне $0,990 \pm 0,005$, что соответствует значению потока отказов $\omega_{cp} \forall 0,01 \text{ год}^{-1}$. Например, по энергосистеме "Коленерго" в 2000–2001 гг. среднее значение вероятности безотказной работы для дефектов второй группы аварийности, которые согласно нормативным документам необходимо устранить при внеплановом ремонте, равно $R_{cp} = 0,995 (\omega_{cp} \forall 0,005 \text{ год}^{-1})$. Наконец, для дефектов третьей группы аварийности, которые подлежат немедленному ремонту, $R_{cp} \forall \forall 0,999 (\omega_{cp} \forall 0,001 \text{ год}^{-1})$.

На рис.1 представлены экспериментальные данные для функции распределения наработки до отказа $F^*(t)$, полученной при анализе данных тепловизионного контроля всех наблюдаемых дефектов, которым присваивается различная категория ремонта (плановый, внеплановый, аварийный) на одном из предприятий (кривая 1), теоретическая функция (2), полученная по соотношению $F(t) = 1 - \exp(-\omega_{cp} t)$ при среднем значении потока отказов $0,012 \text{ 1/год}$, а также мера их расхождения $D(t)$ (3).

Для показателей безотказности обычно задают значения 90; 95; 99, 99,5% и т.д. Тогда вероятность возникновения отказа на отрезке $[0, t]$

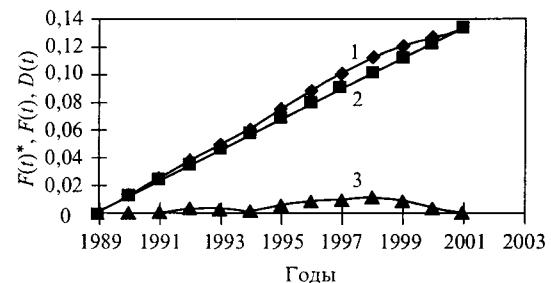


Рис.1. Функции распределения наработки до отказа

будет составлять 0,10; 0,05; 0,01; 0,005 и т.д. Задаваемые значения γ для критических отказов должны быть близки к 100%, чтобы сделать эти отказы практически невозможными событиями. Для прогнозирования потребности в запасных частях и т.п. могут потребоваться гамма-процентные показатели при более низких значениях, например $\gamma = 50\%$, что приближенно соответствует средним значениям.

На рис.2 представлены экспериментальные функции вероятности безотказной работы при среднем значении потока отказов $0,012 \text{ год}^{-1}$ (кривая 1; все контакты) и $0,0015 \text{ год}^{-1}$ (кривая 2; аварийные контакты). Из приведенных данных (рис.2,а) видно, что 50%-я гамма-процентная наработка для всех контактов составляет примерно 60 лет.

Анализ данных для всех контактов (рис.2,б, кривая 1) позволяет сделать вывод, что, например, 99,8%-я наработка равна $t_{\gamma} = 2$ месяцам; 99,6% – $t_{\gamma} = 4$ месяца, 98,8%-я наработка составляет 12 месяцев.

Полученные данные позволяют не только с соответствующей точностью рассчитать, сколько новых дефектов контактных соединений образуется через заданный период времени, например, между регулярными тепловизионными испытаниями, но и, задав определенное значение вероятности, рассчитать сроки тепловизионной диагностики.

С другой стороны, анализ данных (рис.2,а, б, кривые 2) позволяет оценить вероятность появления *критических* (аварийных) дефектов, ответственных за достижение *критического состояния*.

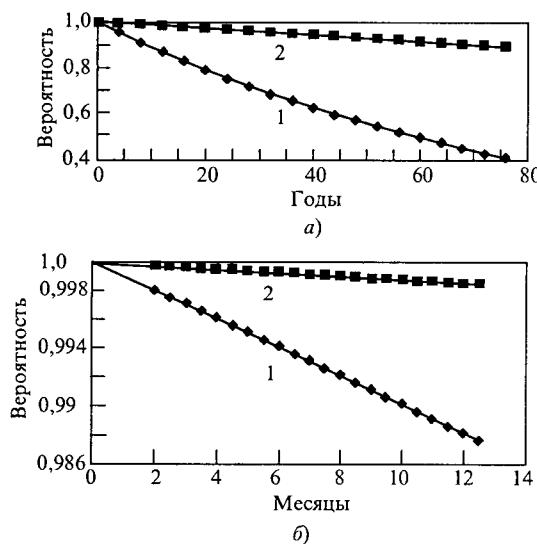


Рис.2. Изменение вероятности безотказной работы контактных соединений со временем:

1 – все дефекты; 2 – критические (аварийные) дефекты

Например, 99,85% гамма-процентная наработка составляет 12 мес. Это означает, что в течение года *критические* дефекты образуются с вероятностью безотказной работы 0,9985.

Как оценить полученные значения потока отказов? Например, если во всей энергосистеме насчитывается 10000 контактных соединений, то при $\omega_{cp} = 0,0015 \text{ год}^{-1}$ через 1 год могут образоваться $10000 \cdot 0,0015 = 15$ контактов, которые необходимо устраниить в немедленном отключении оборудования. Для подстанции, насчитывающей, например, 400 контактных соединений, в течение 3 лет может образоваться не более 2 аварийных контактов.

Полученные данные показывают, что с помощью тепловизионной диагностики контактных соединений возможно прогнозирование состояния энергетических объектов, оптимизация сроков планового ремонта и тепловизионных испытаний.

Подобный подход к тепловизионной диагностике показывает на необходимость разработки норм, учитывающих показатели надежности и гамма-процентные показатели для контактных соединений электрического оборудования.

Список литературы

1. Власов А.Б. Обработка и анализ данных тепловизионного контроля // Электротехника. 2002. № 7. С.37–43.
2. Власов А.Б., Джура А.В. Оценка параметров надежности контактных соединений по данным тепловизионного контроля // Электротехника. 2002. № 6. С.2–5.
3. Власов А.Б. Расчет эксплуатационных показателей надежности контактных соединений с помощью тепловизионного контроля // Электротехника. 2002. № 8.
4. Власов А.Б. Факторный анализ показателей надежности контактных соединений по данным тепловизионного контроля // Электротехника. 2003. № 4. С.51–55.
5. Власов А.Б., Джура А.В. Анализ данных тепловизионного контроля электрооборудования в Колэнерго // Электрические станции. 2002. № 7. С.47–50.
6. Власов А.Б. Тепловизионный контроль или диагностика? // Электротехника. 2002. № 11.
7. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов.
8. ГОСТ 23483-79. Методы теплового вида. Общие требования. Контроль неразрушающий.
9. ГОСТ 10434-82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования.
10. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
11. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.

Власов Анатолий Борисович – профессор кафедры электрооборудования судов Мурманского ГТУ. Окончил физический факультет Ленинградского ГУ в 1973 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Старение неполярных полимерных диэлектриков при одновременном воздействии переменного электрического напряжения и электролитов" в 1980 г.

Определение эквивалентных параметров энергосистемы в процессе ее динамического перехода

ЯКИМЕЦ И.В., ШЕВЦОВ М.В.

Предложен метод оценки эквивалентных параметров электроэнергетических систем на основе анализа кривых изменения напряжения в узлах электроэнергетической системы в режиме качаний.

Действия управления и противоаварийной автоматики в электроэнергетической системе (ЭЭС) базируются, как правило, на соответствующем выборе эквивалентной схемы электропередачи, анализ поведения которой при различных видах возмущения позволяет оценить эффективность мероприятий, направленных на сохранение устойчивости ЭЭС. При этом выполнение одного из базовых условий функционирования противоаварийной автоматики – адаптации к изменениям схемы и режимов энергосистемы в процессе эксплуатации требует постоянной корректировки параметров ее эквивалентной схемы. Согласно [1] большое количество аварий в ЭЭС вызвано именно тем, что области устойчивости, определенные для заданной структуры и режима сети, не охватывают всех возможных в эксплуатации ситуаций. Информация о параметрах упрощенной модели энергосистемы к моменту возмущения особенно важна для формирования самонастраивающейся автоматики, базирующейся на принципах оценки текущих границ устойчивости и управлении моделью, прогнозирующей переходной процесс.

Вопросы упрощения математических моделей динамики ЭЭС при возмущениях имеют весьма разностороннюю проработку [2].

В качестве общего критерия эквивалентности рассматривается требование инвариантности параметров режима в узлах примыкания непреобразуемых и преобразуемых частей ЭЭС, которое сводится к выполнению соотношения [2], [3]:

$$\dot{S}_k^3 = \dot{S}_k, \quad \dot{U}_k^3 = \dot{U}_k, \quad (1)$$

где $k = 1, \dots, m$ – узлы примыкания; \dot{S}_k – мощности, притекающие к узлу примыкания из преобразуемой части системы; \dot{U}_k – напряжение в узлах примыкания; \dot{S}_k^3 , \dot{U}_k^3 – мощность и напряжение эквивалентируемой части энергосистемы.

The method of an estimation of equivalent parameters of electrical power systems is offered on the basis of the analysis of curves of a voltage variation in site of an electrical power system in a mode of swingings.

Соотношению (1) отвечают условия для токов, притекающих к узлам примыкания,

$$\dot{I}_k^3 = \dot{I}_k. \quad (2)$$

ЭДС, мощность и постоянная инерции эквивалентного генератора, а также параметры пассивного многоугольника сопротивления, через который эквивалентный генератор соединяется с остальной частью схемы, определяются условиями преобразования математической модели энергосистемы в нормальном и переходных режимах [2]. В частности, наиболее используемым критерием является требование равенства мощности эквивалентного генератора сумме мощностей генераторов преобразуемой части схемы.

Последнее требование, в общем случае, несовместимо с условием (1) в связи с известным положением о несоответствии в линейных электрических цепях внутренней мощности эквивалентного генератора сумме мощностей объединяемых источников. На практике для устранения указанного несоответствия применяется ряд методов, сводящихся либо к использованию разных значений ЭДС эквивалентного генератора, либо разных значений взаимных проводимостей генератора относительно узла примыкания. В частности, в [2] предложено преобразуемый участок от узла примыкания до эквивалентного генератора представить в виде П-образной схемы замещения с эквивалентными проводимостями \dot{Y}_{11}^3 , \dot{Y}_{13} , \dot{Y}_{33} , где \dot{Y}_{11}^3 – собственная проводимость узла примыкания относительно эквивалентного генератора, не зависящая от напряжения в узле примыкания; \dot{Y}_{33} – собственная проводимость эквивалентного генератора относительно узла примыкания, \dot{Y}_{13} – взаимная проводимость между указанными узлами (рис.1). В соответствии с принятым в теории линейных электрических цепей определением внутренней проводимости источника

$$\dot{Y}_{11}^3 = \dot{Y}_{10} + \dot{Y}_{13}; \quad \dot{Y}_{33} = \dot{Y}_{30} + \dot{Y}_{13}, \quad (3)$$

где \dot{Y}_{10} , \dot{Y}_{30} – проводимости шунтов в узле примыкания и узле включения в сеть эквивалентного генератора.

Выбор вида эквивалентной схемы замещения преобразуемой части ЭЭС следует увязать с типом решаемых задач автоматики: \dot{Y}_{11}^3 рассматривается при управлении режимом ветви примыкания в непреобразуемом участке сети, \dot{Y}_{33} – при управлении мощностью ветви самого эквивалентного генератора.

В настоящей работе рассматривается возможность функционирования противоаварийного управления энергосистемой на основе измерения токов и напряжений в ветви примыкания эквивалентных подсистем в двухмашинной схеме замещения электропередачи. В качестве параметров, определяющих действия автоматики, помимо измеряемых токов и напряжений ветви рассматриваются величина и фаза эквивалентных генераторов и сопротивление прямой последовательности электропередачи. Отличительной особенностью метода является то, что указанные параметры могут быть рассчитаны микропроцессорным устройством автоматики в процессе эксплуатации энергосистемы при изменении ее режима и структуры, не приводящих к нарушению устойчивости. Это, в свою очередь, открывает возможность для формирования устройств автоматики фиксации аварийной перегрузки по связям электропередачи, автоматики выявления и ликвидации асинхронного режима, дистанционной защиты и т.п., адаптивной к изменению структуры и режима энергосистемы. Следует отметить, что, согласно [1] большое количество аварий вызвано тем, что области устойчивости, определенные для заданной структуры и режимов работы энергосистем, не охватывают всех возможных в эксплуатации ситуаций.

На рис.1 приведена двухмашинная схема замещения электроэнергетической системы, ток и напряжения в узлах которой определяются соотношениями:

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{z_1 + z_L + z_2} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{\Sigma z}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - \frac{(\dot{E}_1 - \dot{E}_2) z_1}{z_1 + z_L + z_2} = \\ &= E_1 e^{j\phi_1} \frac{(z_2 + z_L)}{\Sigma z} + E_2 e^{j\phi_2} \frac{z_1}{\Sigma z}, \end{aligned} \quad (5)$$

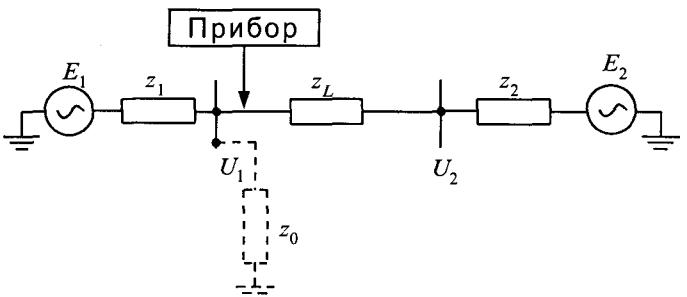


Рис.1. Схема сети простейшей структуры

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{E}_1 - \frac{(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)(z_1 + z_L)}{z_1 + z_L + z_2} = \\ &= E_1 e^{j\phi_1} \frac{z_2}{\Sigma z} + E_2 e^{j\phi_2} \frac{z_1 + z_L}{\Sigma z}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\dot{E}_1 = E_1 e^{j\phi_1}$, $\dot{E}_2 = E_2 e^{j\phi_2}$ – комплексы ЭДС эквивалентных генераторов 1, 2; ϕ_1 , ϕ_2 – аргументы комплексов ЭДС в системе синхронных координат; z_1 , z_2 – комплексные сопротивления подсистем, формирующих двухмашинную схему замещения электропередачи относительно контролируемого автоматикой участка сети (ветви примыкания) с сопротивлением z_L ; \dot{U}_1 , \dot{U}_2 – комплексы напряжений в узлах примыкания.

При рассмотрении электромеханического переходного процесса, приводящего к относительному движению роторов генераторов 1 и 2, принимаем вектор ЭДС \dot{E}_1 неизменным по модулю и фазе в системе синхронных координат, что в общем случае соответствует напряжению системы на шинах бесконечной мощности, а вектор ЭДС \dot{E}_2 – неизменным по модулю (\dot{E}' за сопротивлением x'_d). Считаем также, что сопротивление ветви примыкания z_L известно службам эксплуатации энергосистемы и с достоверной точностью может быть использовано при формировании уставок автоматики.

С учетом принятых допущений траектории напряжений \dot{U}_1 , \dot{U}_2 при относительном движении векторов ЭДС генераторов будут формировать дуги окружностей (рис.2), центры и радиусы которых определяются выражениями

$$\begin{aligned} C_1 &= E_1 e^{j\phi_1} \frac{(z_2 + z_L)}{\Sigma z}; \quad R_1 = E_2 e^{j\phi_2} \frac{z_1}{\Sigma z}; \\ C_2 &= E_1 e^{j\phi_1} \frac{z_2}{\Sigma z}; \quad R_2 = E_2 e^{j\phi_2} \frac{z_1 + z_L}{\Sigma z}. \end{aligned} \quad (7)$$

На основе соотношений (7)

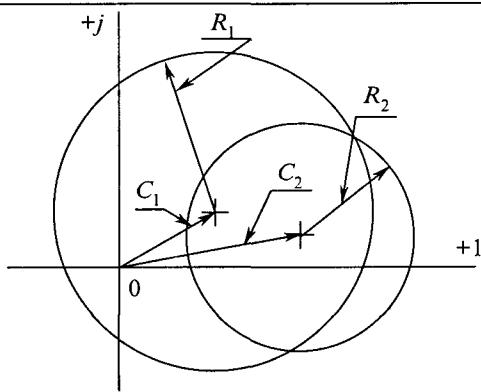


Рис.2. Траектории напряжений по узлам линии электропередачи

$$z_1 = z_L \left(\frac{R_2}{R_1} - 1 \right); \quad z_2 = z_L \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right);$$

$$\delta = \phi_1 - \phi_2 = \arg \left(\frac{R_2 - R_1}{C_1 - C_2} \right). \quad (8)$$

В соответствии с (8), фиксируя, например при качаниях в энергосистеме, положения векторов напряжений в двух узлах электропередачи, ограничивающих контролируемую устройством автоматики зону, и определяя параметры окружностей, формируемых дугами траекторий этих напряжений, можно рассчитать как эквивалентные сопротивления, так и текущее значение угла электропередачи.

Полученные для простейшей схемы энергосистемы (рис.1) значения сопротивлений можно соотнести с выражениями (3), характеризующими более общий эквивалент. В частности, в случае наличия в узле включения автоматики (рис.1) отбора мощности (сопротивление z_0) собственная проводимость узла примыкания относительно генератора 1

$$\dot{Y}_{11}^3 = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_0}. \quad (9)$$

Как уже говорилось, выбор используемых эквивалентных параметров непосредственным образом связан с функциональными задачами автоматики. В частности, для устройств дистанционной защиты, контролирующих состояние ветви примыкания z_L , эквивалентируемая часть энергосистемы замещается активным двухполюсником с внутренней проводимостью \dot{Y}_{11}^3 [4]. Такое представление эквивалента позволяет формировать цепи замыкания токов в случае аварии в контролируемой зоне. Для устройств автоматики выявления и ликвидации асинхронного режима определяющим параметром явля-

ется угол электропередачи, для вычисления которого используется проводимость

$$\frac{1}{z_1} = \dot{Y}_{11}^3 - \frac{1}{z_0}.$$

Общие представления об определении эквивалентных параметров электропередачи в том числе и шунтов (z_0) при эквивалентировании большого числа генераторов изложены в [3], а задача построения траекторий напряжения в передаче с отбором мощности рассмотрена в [5]. Однако в связи с тем, что траектории токов и напряжений представляют собой окружности только в случае синфазного движения генераторов в эквивалентируемой части энергосистемы, то вопросы соответствия полученных в процессе обработки траекторий эквивалентных параметров электропередачи сложной структуры требуют дополнительного разъяснения.

Напряжение U_{XX} активного двухполюсника, эквивалентирующего действия ЭДС группы генераторов, можно представить выражением [4]

$$U_{XX} = \dot{E}_{\text{экв}} = k_{1XX} \dot{E}_1 + k_{2XX} \dot{E}_2 + \dots + k_{nXX} \dot{E}_n, \quad (10)$$

где k_{iXX} – коэффициент передачи схемы по напряжению для режима XX относительно узла примыкания i -го генератора (k_{iXX} зависят от топологии схемы и для линейных цепей остаются неизменными); $\dot{E}_i = \dot{E}'$ – ЭДС генератора.

В переходном процессе при условии сохранения числа генераторов, формирующих группу (взаимные углы между векторами ЭДС генераторов не превышают критических значений)

$$\dot{E}_{\text{экв}}(t) = k_{1XX} E_1 e^{j[\phi_1 + \psi_1(t)]} + k_{2XX} E_2 \times \\ \times e^{j[\phi_2 + \psi_2(t)]} + \dots + k_{nXX} E_n e^{j[\phi_n + \psi_n(t)]}, \quad (11)$$

где $\psi_i(t)$ – функция изменения угла i -го генератора.

Если

$$\psi_1(t) = \psi_2(t) = \dots = \psi_n(t), \quad (12)$$

то для эквивалентной ЭДС в любой момент времени можно записать

$$\dot{E}_{\text{экв}} = U_{XX} = e^{j\psi(t)} (k_{1XX} E_1 e^{j\phi_1} + k_{2XX} E_2 \times \\ \times e^{j\phi_2} + \dots + k_{nXX} E_n e^{j\phi_n}) = e^{\psi(t) + \phi_{\text{экв}}} E_{\text{экв}}. \quad (13)$$

В соответствии с (13) при выполнении условия (12) эквивалентируемую часть энергосистемы можно представить эквивалентным генератором, амплитуда ЭДС которого неизменна, а аргумент меняется.

Как правило условие (12) не выполняется, но в функции изменения угла каждого генератора можно выделить функцию изменения угла δ центра инерции эквивалентируемой подсистемы и функцию малых отклонений $\psi_{m,oi}$ угла i -го генератора от движения центра инерции

$$\varphi_i(t) = \delta_{ц.и}(t) + \psi_{m,oi}(t), \quad \delta = \sum_i T_{Ji} \varphi_i(t) / \sum_i T_{Ji}, \quad (14)$$

где T_{Ji} – постоянная инерции i -го генератора.

Выражение (11) в таком случае можно записать в виде

$$\dot{E}_{экв}(t) = e^{j\delta} (k_{1XX} E_1 e^{j[\varphi_1 + \psi_{m,01}(t)]} + k_{2XX} E_2 \times \\ \times e^{j[\varphi_2 + \psi_{m,02}(t)]} + \dots + k_{nXX} E_n e^{j[\varphi_n + \psi_{m,0n}(t)]}). \quad (15)$$

В соответствии с [3] в системе дифференциальных уравнений движения эквивалентного генератора переменная δ является медленной, а переменные $\psi_{m,oi}$ – быстрыми и формально характеризуют малый параметр в составе уравнения движения. Влияние этого параметра на уравнение движения тем меньше, чем больше генераторов в эквивалентируемой подсистеме. Кроме того, излагаемый метод предназначен для формирования уставок автоматики в предаварийном режиме и базируется на анализе процессов энергосистемы, не приводящих к нарушению ее устойчивости (качания в допустимом диапазоне изменения углов).

С учетом указанных допущений, полагая, что функции малых отклонений углов отдельных генераторов от угла центра инерции эквивалентируемой подсистемы имеют периодический характер с небольшими амплитудами, выражение (15) в первом приближении можно представить в виде, аналогичном (13)

$$\dot{E}_{экв}(t) = e^{j\delta} E_{экв} e^{j\varphi_3}. \quad (16)$$

Удобство такого представления эквивалентного генератора заключается еще и в том, что в соответствии с [6] именно взаимные углы между центрами инерции отдельных подсистем используются для оценки устойчивости всей энергосистемы в целом.

Эквивалентное сопротивление подсистемы (внутреннее сопротивление активного двухполюсника) определяется как входное сопротивление относительно узла примыкания. При получении этого эквивалента генераторы могут быть представлены сопротивлениями x'_d , а нагрузки – неизменными сопротивлениями [1].

Хотя при представлении нагрузок постоянными сопротивлениями эквивалентное сопротивление подсистемы неизменной структуры не дол-

жно зависеть от того, синфазно движутся генераторы или нет, однако определение этих сопротивлений в соответствии с выражениями (8) делает их зависимыми от параметров траекторий напряжения в узлах электропередачи.

Траектории токов и напряжений могут представлять собой геометрические фигуры в виде окружностей только в случае идеально синфазного движения генераторов или в случае наличия в эквивалентируемой подсистеме одной синхронной машины. В случае эквивалентирования генераторов разной мощности и постоянных инерции траектории будут отклоняться от формы окружности в связи с отклонением углов отдельных генераторов от угла центра инерции. Определенное влияние на изменение формы окружности оказывают и погрешности измерительного тракта устройства автоматики. В общем случае совокупность всех возможных помех можно рассматривать как случайные воздействия на траектории напряжений или токов, формирующие в процессе измерения некие точки, которые не лежат на окружности, а колеблются около нее. Другой причиной, усложняющей процесс определения эквивалентных параметров электропередачи, является необходимость определения параметров окружности (центр и радиус) на основе информации о ее дуге ограниченного углового размера. Это обстоятельство связано с тем, что в качестве основного информационного режима рассматривается режим качаний, не приводящий к нарушению устойчивости энергосистемы. Преодоление указанных трудностей в построении расчетной траектории позволит наиболее точно определить эквивалентные параметры электроэнергетической системы сложной структуры, в том числе и значение угла центра ее инерции.

Решаемая проблема может быть сформулирована следующим образом: для n точек, заданных на плоскости координат (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$, уравнение окружности, к которой должны стремиться эти точки, имеет вид

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2. \quad (17)$$

В соответствии с классическим представлением метода наименьших квадратов (МНК) для определения параметров окружности необходимо минимизировать квадрат расстояния от данных точек к указанной окружности, т.е. минимизировать функцию

$$L(a, b, R) = \sum_{i=1}^n \rho_i^2, \quad (18)$$

где

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R. \quad (19)$$

Проведенные на основе соотношений (17)–(19) исследования по определению параметров окружности с моделированием отклонения точек в виде

$$x_i = x_m + [R(1 - r_p) + r n d 2 R r_p] \cos\left(\frac{i \pi}{180}\right); \\ y_i = y_m + [R(1 - r_p) + r n d 2 R r_p] \sin\left(\frac{i \pi}{180}\right), \quad (20)$$

где $i = 1, \dots, n$; r_p – относительная погрешность; $r n d$ – генератор случайных чисел в диапазоне от 0 до 1 по закону нормального распределения; R , x_m , y_m – задаваемые радиусы и координаты центра идеальной окружности, n – количество имитируемых точек на окружности, показали, что применение МНК в его классическом представлении не позволяет в полном объеме удовлетворить требованиям, выдвигаемым работой энергосистемы в режиме качаний. В частности, при погрешности отклонения до 5% для получения приемлемого результата угловой размер анализируемой дуги должен быть не менее 90–100°, а при погрешности отклонения 2% – более 70°. В первую очередь это связано с нелинейной зависимостью ρ_i от параметров окружности и необходимости тщательного выбора первой аппроксимации (a_0, b_0, R_0) в связи с итерационной процедурой МНК, использующей линеаризацию на каждом шаге расчета.

В связи с изложенным для практического применения в задачах определения параметров окружностей, формируемых траекториями изменяющегося напряжения в узлах энергосистемы, был выбран метод изменяемой линейной регрессии [7] с соответствующей модернизацией метода для условий работы электропередачи. Этот метод является линейным, не требует точного выбора первоначальных параметров (a_0, b_0, R_0) , менее требователен к вычислительным ресурсам.

Суть метода заключается в минимизации функции

$$K(a, b, R) = \sum_{i=1}^n ((x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2)^2. \quad (21)$$

При этом центр системы координат переносится к участку анализируемой дуги окружности. В этом случае $R^2 = a^2 + b^2$ и, следовательно,

$$\tilde{K}(a, b, R) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2 - 2ax_i - 2by_i)^2. \quad (22)$$

Для определения параметров a , b , R необходимо

найти частные производные $\frac{\partial \tilde{K}(a, b, R)}{\partial a}$ и

$\frac{\partial \tilde{K}(a, b, R)}{\partial b}$, с учетом принятых допущений, и

решить получившуюся систему линейных уравнений:

$$-P + 2XXa + 2xyb = 0; -Q + 2XYa + 2YYb = 0, \quad (23)$$

где

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i ((x_i)^2 + (y_i)^2);$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ((x_i)^2 + (y_i)^2);$$

$$XX = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2; \quad YY = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2;$$

$$XY = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i x_i).$$

На основе изложенного метода был разработан расчетный алгоритм определения эквивалентных параметров энергосистемы, базирующийся на анализе дуг траекторий изменяющегося напряжения в ее узлах в режиме качаний, и проведены вычислительные эксперименты для двух типов электроэнергетических систем: простейшей структуры, аналогичной рис.1, и сложной структуры (рис.3). Изменяющиеся режимы энергосистем создавались изменением сопротивлений сети на различных участках электропередачи и моделировались с использованием ПВК "СПРУТ".

Для проверки и отладки разработанного алгоритма на первом этапе анализировался режим качаний в энергосистеме (рис.1) с исходным значением параметров: $z_1 = z_1 \parallel z_0 = 3,8 + j 50,4$ Ом; $z_2 = j 51,6$ Ом; $z_0 = 1022 + j 579$; $z_L = 4 + j 68$ Ом; генератор 1: $P_{\text{г.ном}} = 1800$ МВт; $U_{\text{г.ном}} = 525$ кВ; $T_j = 8$ с; $x'_d = 0,26$ о.е.; генератор 2: $P_{\text{г.ном}} = 100000$ МВт; $U_{\text{г.ном}} = 525$ кВ; $T_j = 10$ с; $x'_d = 0,01$ о.е.

Возмущения создавались изменением сопротивлений z_L в диапазоне от $4,1 + j 69,7$ до $5,33 + j 90,67$. Анализировались траектории напряжения в узлах 3 и 2.

Поскольку эквивалентные генераторы энергосистемы (рис.1) были представлены одной синхронной машиной, то окружности, соответствующие траекториям напряжений в узлах, имели практически идеальный характер и алгоритм

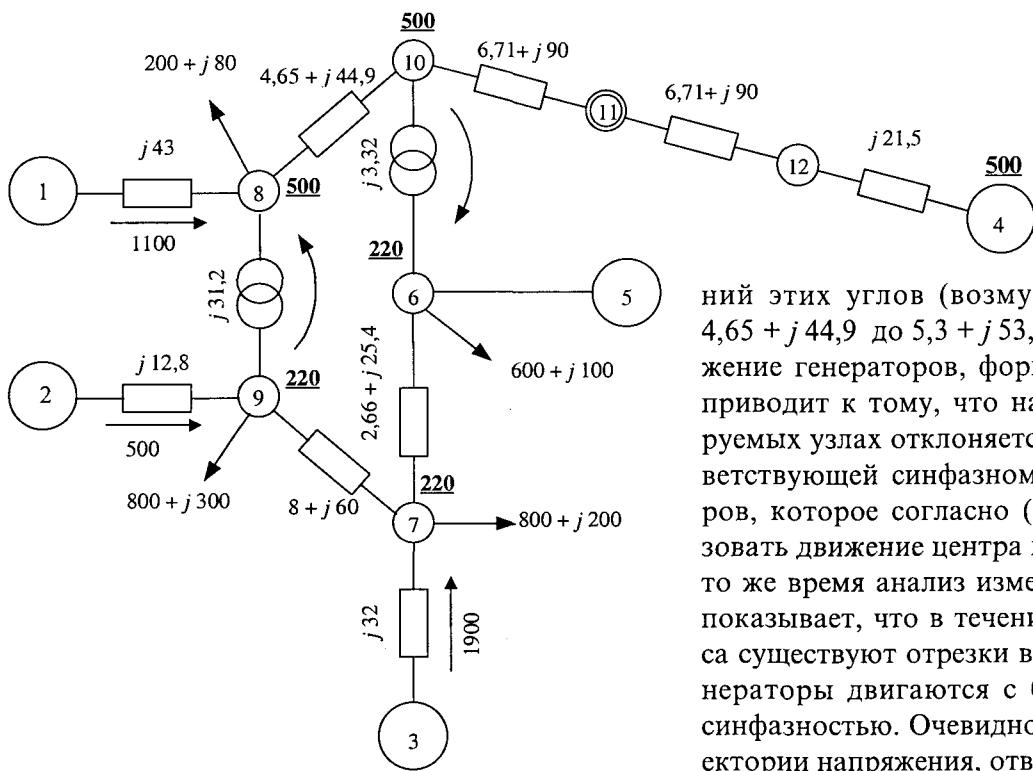


Рис.3. Схема сети сложной структуры

показал высокую точность расчета в широком диапазоне изменения сопротивлений (максимальная ошибка не превышала 2%). Удовлетворительные результаты были получены даже для дуг в несколько градусов.

Более сложные эксперименты были проведены для схемы сети (рис.3), содержащей четыре синхронных машины, формирующих эквивалентный генератор. Исходные параметры синхронных машин и их регуляторов приведены в табл.1. и 2, параметры участков электропередачи (Ом) и перетоки активных и реактивных мощностей (МВт, Мвар) показаны на рис.3.

В данном эксперименте ставилась задача определения эквивалентных сопротивлений относительно узла 10 и угла электропередачи при возмущениях внутри эквивалентируемой сети. Фиксировалось изменение напряжений в узлах 10 и 11, ограничивающих зону передачи, контролируемую автоматикой. Минимальный размер анализируемых участков дуг траекторий составлял 12–15°. Результаты функционирования алгоритма для разных условий возмущения приведены в табл.3 (п.п. 1, 3, 5).

Анализ причин получения достаточно больших погрешностей при определении эквивалентных сопротивлений показал, что они, в основном, связаны с несинфазностью движения генераторов в переходном процессе качания энерго-

системы. Наличие такой несинфазности подтверждают кривые изменения углов генераторов 1, 2, 3, построенные на рис.4 без учета начальных значе-

ний этих углов (возмущение линии 10–8 от $4,65 + j 44,9$ до $5,3 + j 53,585$). Несинфазное движение генераторов, формирующих эквивалент, приводит к тому, что напряжение в контролируемых узлах отклоняется от окружности, соответствующей синфазному движению генераторов, которое согласно (15) должно характеризовать движение центра инерции подсистемы. В то же время анализ изменения кривых на рис.4 показывает, что в течение переходного процесса существуют отрезки времени, на которых генераторы двигаются с большей или меньшей синфазностью. Очевидно, что отрезок дуги траектории напряжения, отвечающий наиболее синфазному движению генераторов, будет наиболее близок к окружности и следовательно соответствовать минимальному значению среднеквадратичного отклонения (СКО). Разработанный расчетный алгоритм на основе использования признака СКО позволил существенно увеличить точность определения эквивалентных сопротивлений энергосистемы (табл.3, пп. 2, 4, 6). Данные табл.3 показывают, что результат получается тем точнее, чем меньше значение СКО, т.е. чем меньше СКО, тем большее доверие к полученным результатам. Указанный признак может быть использован при формировании алгоритмов работы устройств автоматики, блокируя использование недостаточно точных результатов, для которых СКО превышает пороговое значение.

На рис.5 приведены кривые изменения углов генераторов δ_1 , δ_2 , δ_3 и средневзвешенного угла $\delta_{ц.и}$ движения центра инерции подсистемы (14), рассчитанных программным комплексом "СПРУТ" при возмущении, вызванном изменением сопротивления участка схемы линии 10–8. Приведенная на рис.5 кривая изменения угла δ получена на основе использования рассчитанных эквивалентных сопротивлений энергосистемы с использованием определенных ПТК "СПРУТ" значений токов и напряжений в контролируемой линии 10–11. Изменение кривых δ_1 и $\delta_{ц.и}$ показывает хорошее совпадение: максимальная разность примерно 2–3° при $t = 4$ с, когда генераторы движутся практически синфазно.

Таблица 1

Номер узла	Тип генератора	$P_{\text{ном}}, P_{\text{рек}}, \text{МВт}$	$S_{\text{ном}}, \text{Мвар}$	$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$\cos \phi_{\text{н}}$	$x'_{\phi} \text{ о.е.}$	$T_j, \text{с}$
1	ТГ	1200 1100	1400	525	0,85	0,36	4,8
2	ТГ	500 500	590	242	0,85	0,2	9,85
3	ГГ	2025 1700	2380	242	0,85	0,35	9,5
5	СК	—	160	220	—	0,434	2,8

Таблица 2

Номер узла	Тип генератора	$\sigma_{\text{APC}}, \text{о.е.}$	$z_{\text{иЧ}}, \text{Гц}$	$\mu_{\text{max}}, \text{о.е.}$	$\mu_{\text{min}}, \text{о.е.}$	$T_c^+, \text{с}$	$T_c^+, \text{с}$
1	ТГ	0,05	0,15	1,05	0	1,5	0,2
2	ТГ	0,05	0,15	1,05	0	1	0,2
3	ГГ	0,02	0,15	1,05	0	—	—

Таблица 3

№	Элемент возмущения	Значение до возмущения, Ом	Значение после возмущения, Ом	Эквивалентное сопротивление сети, Ом	Расчетное эквивалентное сопротивление сети, Ом	Погрешность модуля эквивалентного сопротивления, Ом	Погрешность фазы эквивалентного сопротивления, град	СКО, о.е.
1	Линия 6–7	$2,66 + j 25,4$	$2,9 + j 28$	$18,5 + j 67,6$	$25,14 + j 74,8$	−8,826	−3,3	0,631
2	Линия 6–7	$2,66 + j 25,4$	$2,9 + j 28$	$18,5 + j 67,6$	$18,5 + j 62,4$	5	−1,208	0,013
3	Линия 10–8	$4,65 + j 44,9$	$5,3 + j 53,6$	$19 + j 69,6$	$29,2 + j 72,8$	−6,3	−6,6	1,304
4	Линия 10–8	$4,65 + j 44,9$	$5,3 + j 53,6$	$19 + j 69,6$	$15,5 + j 66,7$	3,7	2,187	0,025
5	Линия 9–7	$8 + j 60$	$15 + j 110$	$18 + j 67,6$	$27,6 + j 72,6$	−7,7	−5,9	1,007
6	Линия 9–7	$8 + j 60$	$15 + j 110$	$18 + j 67,6$	$20,8 + j 60,7$	−5,8	−4	0,118



Рис.4. Изменение углов генераторов 1, 2 и 3 без учета начальных значений

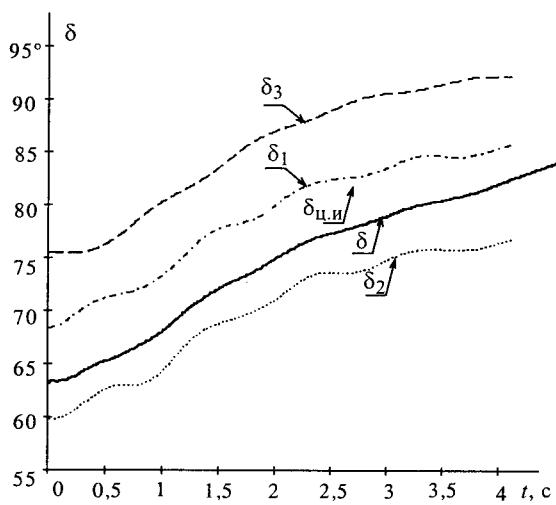


Рис.5. Изменение углов генераторов $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, угла центра инерции системы $\delta_{\text{ци}}$ и угла δ

Список литературы

- Портной М.П., Рабинович Р.С. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. М.: Энергия, 1978.
- Электрические сети / Под ред. В.А. Веникова. М.: Высшая школа, 1971.
- Абраменкова Н.А., Воропай Н.И., Заславская Т.Б. Структурный анализ электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990.
- Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М-Л.: ГЭИ, 1957.
- Якимец И.В., Наровлянский В.Г., Осоков Г.А., Налевин А.А. Выявление асинхронного режима в условиях неполной информации об эквивалентных параметрах энергосистемы // Сб. научных трудов ОАО "Институт Энергосетьпроект" Электроэнергетика России: Современное состояние, проблемы и перспективы". М.: Энергоатомиздат, 2002.
- Горев А.А. Избранные труды по вопросам устойчивости электрических систем. М-Л.: ГЭИ, 1960.
- Chernov N.I., Ososkov G.A. Effective algorithms for circle fitting // Computer Physics Communications 33. Nord-Holland, Amsterdam, 1984.

Якимец Игорь Владимирович – заместитель генерального директора института "Энергосетьпроект". Окончил факультет электрификации Московского института сельскохозяйственного производства в 1961 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию в МЭИ (ТУ) по специальности "Электрические машины".

Шевцов Максим Викторович – инженер института "Энергосетьпроект". Окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 2000 г. по специальности "Автоматизированные системы управления ЭЭС".

Исследование вибромеханических характеристик пакета электротехнической стали и возможности их использования для контроля прессовки сердечника статора турбогенератора

ГРИГОРЬЕВ А.В., СЕМЁНОВ Д.Ю., ОСОТОВ В.Н., ЯМПОЛЬСКИЙ Д.А.*

Определены зависимости логарифмического декремента колебаний, резонансной частоты и скорости перемещения волны колебаний от давления прессовки пакета электротехнической стали. Доказана принципиальная возможность использования этих параметров для контроля давления прессовки сердечника статора турбогенератора. Установлено, что наиболее чувствительным к изменению давления прессовки в диапазоне 1–2 МПа является логарифмический декремент колебаний.

В последние годы в ОАО "Свердловэнерго" нашёл применение новый метод контроля и оценки состояния сердечников статоров турбогенераторов. В основе нового метода – оценка механического состояния сердечника путём контроля вибромеханических свойств конструкции статора. В качестве параметров, характеризующих вибромеханические свойства статора, выбраны резонансные частоты и логарифмические декременты колебаний (далее в тексте – декременты колебаний) сердечника. Метод заключается в периодическом определении резонансных частот и декрементов колебаний сердечника и последующей оценке его состояния по значениям этих параметров. Способы контроля прессовки сердечников путём использования резонансных частот и декрементов колебаний запатентованы [1, 2].

Первые опыты использования резонансных частот для контроля состояния сердечника статора турбогенератора были освещены в [3], некоторые данные совместного использования резонансных частот и декрементов колебаний изложены в [4, 5].

Указанные способы контроля базируются на известной зависимости вибромеханических свойств какой-либо конструкции от существующих в ней внутренних механических напряжений.

Сердечник является самым массивным (при мерно 2/3 всей массы статора) и жёстким элементом конструкции статора. Собирается сердечник из листов электротехнической стали, которые в процессе его сборки спрессовываются. Пакет

Dependences of oscillation logarithmic decrement, natural frequency and speed of wave propagation from pressure are determined for packet of electro-technical steel. The opportunity of use of these parameters for the inspection of turbogenerator core pressure is proved. It is established, that oscillation logarithmic decrement is the most sensitive to change of pressure in a range 1–2 MPa.

сердечника в спрессованном состоянии фиксируется стяжными шпильками и нажимными плитами. Состояние упругого сжатия сердечника является одним из основных факторов, влияющим на вибромеханические характеристики конструкции статора.

Неизбежно происходящее с течением времени и в процессе эксплуатации ослабление усилий, сжимающих сердечник, имеет своё непременное отражение в параметрах вибромеханических свойств (жёсткость, резонансные частоты, демпфирование) механической системы статора.

Накопленный опыт использования указанных параметров и имеющиеся случаи не совсем ясных соотношений выявляемых изменений резонансных частот и декрементов колебаний вызвали необходимость проведения специальных лабораторных исследований.

Были поставлены следующие задачи эксперимента:

1) описать на примере пакета электротехнической стали характер зависимости от давления прессовки пакета его резонансной частоты, декремента колебаний и других сопутствующих вибрационных параметров, которые потенциально могли бы быть использованы для контроля давления прессовки;

2) выяснить – какая вибрационная характеристика и при каких условиях является оптимальной для оценки давления прессовки?

Для проведения исследований была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (рис.1), представляющая собой металлическую раму 2 с заключённым в ней пакетом электротехнической стали 4. Для создания регулируемого усилия прессовки пакета стали рама снабжена нажимным винтом 1. Передача усилия

* В проведении экспериментальной части исследования участвовал инженер Хазан М.М.

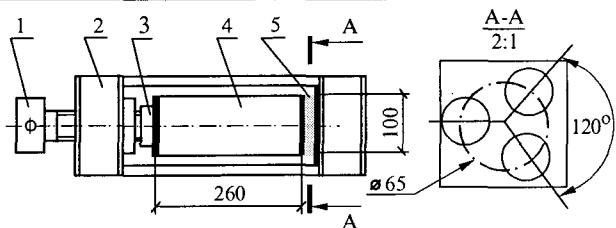


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

винта 1 на пакет стали 4 осуществляется через опорный подшипник 3. Пакет электротехнической стали набран из имеющих оксидное изоляционное покрытие пластин толщиной 0,3 мм и размерами 100×100 мм.

Размеры поперечного сечения экспериментального пакета электротехнической стали были выбраны с учётом возможности создания сжимающего усилия, исходя из удельного давления на пакет 3000 кПа, путём затяжки вручную прессующего винта. При этом для достижения подобия изгибных форм колебаний исследуемого пакета и сердечника статора соотношение поперечного сечения и длины пакета выбраны пропорционально соотношению этих же параметров для реального сердечника статора турбогенератора типа ТГВ-300, а размер стороны квадрата сечения пакета – из условия равенства момента сопротивления квадратного сечения моменту сопротивления кольцевого сечения реального сердечника и затем уменьшен в 22 раза.

Для измерения усилия прессовки использовался тензометрический комплекс ЦТИ-1 производства Краснодарского завода тензометрических приборов. Усилие измерялось тремя датчиками (5 на рис.1), четвёртый использовался для балансировки измерительной схемы. Точность измерений обеспечивалась в пределах $\pm 5\%$.

Для проведения измерений установка располагалась в горизонтальном положении и устанавливалась на деревянные опоры. Общий вид экспериментальной установки показан на рис.2 (места, где располагались деревянные опоры, помечены стрелками с цифрой 6).

Для возбуждения колебаний и фиксации их характеристик использовались специальный импульсный молоток фирмы "Kistler" и четырехканальный спектроанализатор CSI 2400. Для исключения влияния собственного веса пакета на оценки регистрируемых датчиками усилий тензометрический комплекс перед измерениями был оттарирован при вертикальном положении установки.

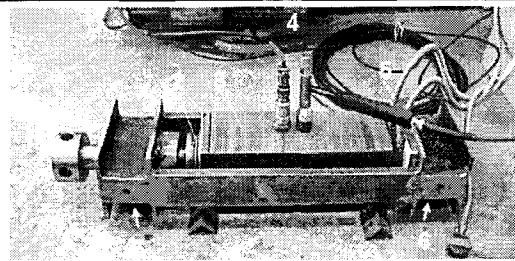


Рис.2. Экспериментальная установка:

1 – нажимной винт; 2 – подшипник; 3 – пакет стали; 4 – акселерометр и ударный молоток; 5 – тензометрические датчики; 6 – места, где располагались деревянные опоры

Далее, в процессе эксперимента усилие прессовки варьировалось нажимным винтом и измерялось при вертикальном положении установки, до и после записи характеристик колебаний.

Вибрационные измерения выполнены на 9 ступенях сжимающего усилия, в диапазоне сил от 3,5 до 40 кН на весь пакет. Для проверки воспроизводимости результатов измерений опыты были проведены дважды. В табл.1 представлены значения сжимающих пакет усилий и удельных давлений, при которых производились вибрационные измерения.

Возбуждение колебаний и регистрация их характеристик проводились при горизонтальном положении установки. Колебания возбуждались ударом молотка посередине длины пакета. Съём сигналов отклика осуществлялся вибродатчиками.

Таблица 1

Но- мер опыта	Начальное усилие, делений прибора ЦТИ-1	Конечное усилие,	Среднее усилие, кН	Удельное усилие, кПа
1-й цикл измерений				
1	93	89	3,62	362
2	164	159	6,43	643
3	284	282	11,26	1126
4	358	355	14,19	1419
5	449	447	17,83	1783
6	539	535	21,37	2137
7	635	633	25,23	2523
8	757	753	30,05	3005
9	957	949	37,93	3793
2-й цикл измерений				
1	92	89	3,60	360
2	176	172	6,93	693
3	265	260	10,45	1045
4	348	343	13,75	1375
5	439	432	17,33	1733
6	535	528	21,15	2115
7	637	631	25,23	2523
8	723	716	28,64	2864
9	815	807	32,28	3228
10	1000	996	39,72	3972

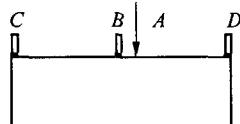


Рис.3. Схема положения места приложения ударного воздействия (точка A) и мест регистрации сигналов отклика: точки B, C и D

ми, установленными в середине и по краям пакета. Схема расположения мест возбуждения колебаний и съёма сигналов отклика показана на рис.3. Регистрация вибросигналов выполнялась в виде виброускорения (м/с^2). Виброграммы временных представлений сигналов возбуждения и отклика из числа полученных в эксперименте показаны на рис.4.

Резонансные свойства исследуемой конструкции идентифицировались классическим методом с использованием передаточных функций, функций когерентности и функций взаимной фазы сигналов возбуждения и сигналов отклика. Для получения передаточных функций использовались импульсное окно для сигнала возбуждения и экспоненциальное окно для сигнала отклика.

Полученные в каждом опыте передаточные функции содержали порядка 5–6 резонансных пиков. На рис.5 представлены передаточные

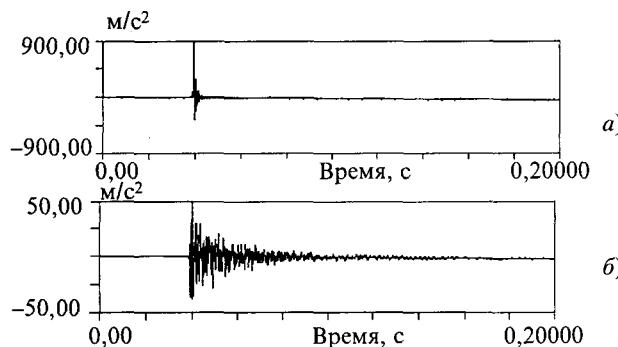


Рис.4. Виброграммы временных представлений сигналов:
а – возбуждения; б – отклика

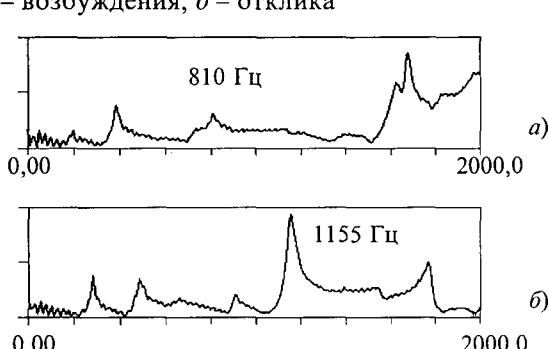


Рис.5. Передаточные функции исследуемого пакета стали:
а – при давлении 1045 кПа; б – при давлении 3228 кПа

Таблица 2

Но- мер опыта	Резо- нансные частоты, Гц	Амплитуды резонансных пиков передаточных функций в точках съёма отклика, (м/с^2)/(м/с^2) [*]		
		Точка C	Точка B	Точка D
8	280	-0,156	-0,148	0,061
	480	0,080	-0,135	-0,012
	655	0,163	-0,067	-0,045
	905	0,121	-0,076	0,061
	1155	0,534	-0,359	0,363
	1770	-0,644	0,195	0,548
10	300	-0,196	-0,154	0,061
	510	0	-0,177	0,024
	730	0,202	-0,057	-0,063
	935	0,136	-0,073	0
	1300	0,876	-0,620	0,769

* Со знаком "минус" – отрицательные значения амплитуд

функции при относительно малом (1045 кПа) и высоком (3228 кПа) давлениях прессовки.

Из нескольких хорошо выраженных резонансных пиков передаточных функций для построения зависимостей вибромеханических параметров исследуемого пакета от давления прессовки был выбран, из соображений наименьшей погрешности определения декремента колебаний, наиболее выраженный пик – на частоте 1155 Гц при давлении 3228 кПа (рис.4, б).

Для идентификации форм колебаний были подвергнуты исследованию колебания на резонансных частотах, полученных в опытах 8 и 10 второго цикла измерений при давлениях прессовки, близких к 3000 и 4000 кПа (см. табл.1). Резонансные частоты и значения амплитуд колебаний в точках съёма сигналов отклика в этих опытах приведены в табл.2.

Графическим построением форм колебаний исследуемого пакета на полученных резонансных частотах было установлено, что выбранный резонансный пик – частота 1155 Гц в опыте 8 и 1300 Гц в опыте 10 (в табл.2 выделены полужирным шрифтом), скорее всего соответствует 3-й изгибной форме колебаний. Для подтверждения графической идентификации формы колебаний было проведено конечно-элементное моделирование колебаний исследуемого пакета, представленного в виде бруса из изотропного материала. Исходя из того, что при реализованных в опытах 8–10 давлениях прессовки исследуемого пакета модуль упругости пакета не может быть меньше, чем в реальном сердечнике, расчет частот изгибных форм колебаний бруса проведен для двух предельных значений модуля упругости – $1,65 \cdot 10^3$ МПа (модуль упругости магнитопровода электрической машины в направлении сжимающей магнитопровод силы) [6] и $2,1 \cdot 10^5$ МПа

(модуль упругости конструкционной стали). Расчёт показал, что колебания бруса по 3-й форме при указанных модулях упругости должны проявляться, соответственно, на частотах 629 и 7100 Гц. Очевидно, что частота колебаний исследуемого пакета по 3-й форме должна находиться в промежутке между полученными расчётом граничными частотами и быть ближе к частоте колебаний пакета при модуле упругости, свойственном магнитопроводу электрической машины, нежели чем однородному стальному брусу. Резонансные пики с частотами 1155 и 1300 Гц в опытах 8 и 10 вполне отвечают названному условию. Поэтому можно полагать, что расчётный метод подтвердил правильность определения формы изгибных колебаний.

В табл.3 представлены вибрационные параметры колебаний исследуемого пакета стали по 3-й форме, полученные обработкой экспериментальных передаточных функций для каждой ступени сжимающего пакета усилия.

На рис.6 показаны полученные зависимости вибромеханических параметров колебаний (декремента колебаний, резонансной частоты и скорости распространения изгибной волны) исследуемого пакета электротехнической стали от давления прессовки.

Таблица 3

Номер опыта	Частота, Гц	Амплитуда, $(\text{м}/\text{с}^2)/(\text{м}/\text{с}^2)$	Декремент колебаний	Разница фаз в точках A и B, град	Разница фаз в точках B и C, град
1-й цикл измерений					
1	645,0	0,0966	—	-161,6	114,3
2	675,0	0,0753	—	-153,3	139,4
3	750,2	0,1459	0,0477	-141,8	172,7
4	835,3	0,2468	0,0215	-148,7	155,4
5	898,6	—	—	-124,02	168,2
6	975,3	0,3073	0,0135	-135,1	148,6
7	1035,3	0,3564	0,0178	-108,7	143,9
8	1115,4	0,5486	0,0081	-113,6	137,5
9	1220,4	0,5521	0,0092	-121,5	132,1
2-й цикл измерений					
1	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—
3	810,3	0,1845	0,0203	-167,6	158,3
4	930,3	0,1392	0,0252	-100,6	154,9
5	980,3	0,2699	0,0115	-132,9	145,5
6	1050,3	0,4151	0,0091	-134,5	136,6
7	1110,4	0,5052	0,0093	-117,8	136,4
8	1155,4	0,5141	0,0111	-105	133,9
9	1210,4	0,8383	0,0066	-104	129,5
10	1300,4	1,11275	0,0062	-126,4	126,8

Примечание: Прочерки в ячейках таблицы свидетельствуют об отсутствии на соответствующих передаточных функциях достаточно выраженных для идентификации резонансных пиков.

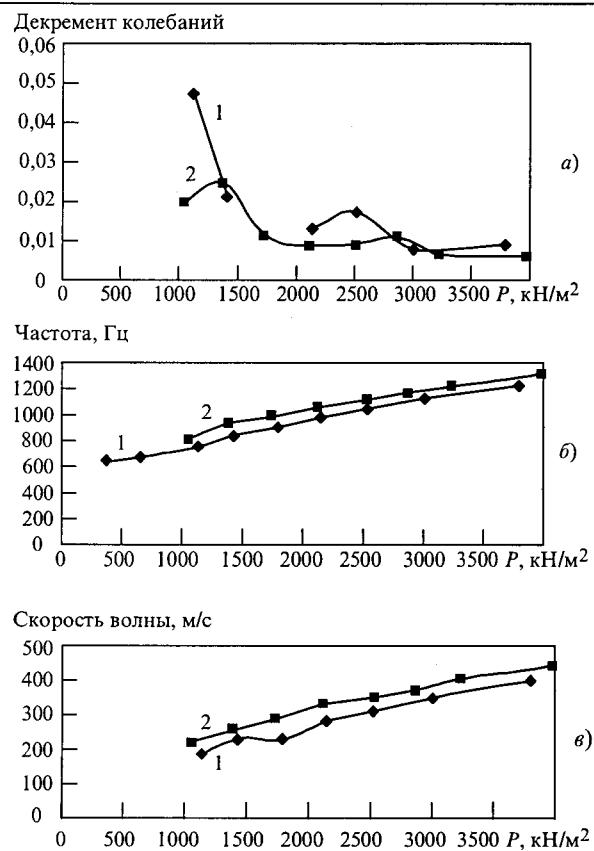


Рис.6. Зависимости от давления прессовки:

а – логарифмического декремента колебаний; б – резонансной частоты; в – скорости распространения волны колебаний; 1 – по данным 1-го цикла измерений; 2 – по данным 2-го цикла измерений

Значения декрементов колебаний (σ) рассчитаны по параметрам резонансных пиков методом половинной мощности. Использовано следующее соотношение [7]:

$$\sigma = \Delta f / 2f_0, \quad (1)$$

где f_0 – резонансная частота, Гц; Δf – ширина резонансного пика передаточной функции на уровне $\sqrt{2}/2$ высоты резонансного пика, Гц.

Оценка скорости распространения изгибной волны вдоль пакета выполнена на основе того, что разность фаз двух синусоид может быть представлена как в единицах времени (в виде временной задержки), так и в угловых долях цикла колебаний:

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta\phi}{360} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta\phi}{360} T = \frac{\Delta\phi}{360f}, \quad (2)$$

где Δt – задержка по времени, с; $\Delta\phi$ – сдвиг по фазе, град; T – период колебаний, с; f – частота, Гц.

С учетом равенства (2) скорость распространения изгибной волны между двумя точками, отстоящими друг от друга на расстоянии l , рас-

Таблица 4

Параметр	Циклы изме-рений	Уравнение регрессии	Коэффи-циент корреляции
Декремент колебаний (σ)	1	$\sigma = 316,98P^{-1,2876}$	0,87
	2	$\sigma = 22,378P^{-0,9908}$	0,81
Резонансная частота (f)	1	$f = 0,1766P + 576,16$	0,99
	2	$f = 0,1596P + 692,24$	0,98
Скорость волны колебаний (v)	1	$v = 0,0789P + 106,95$	0,98
	2	$v = 0,0749P + 157,91$	0,98

считывается по формуле

$$v_u = \frac{l}{\Delta t} = \frac{l 360 f}{\Delta \phi}. \quad (3)$$

Сопоставление характера изменения анализируемых вибромеханических параметров в диапазоне удельных давлений прессовки 1000–4000 кН/м² (10–40 кГ/см²) показало, что с ростом давления прессовки декремент колебаний изменился от 0,035 до 0,0077 (т.е. в 4,5 раза), частота контролируемой формы колебаний – в два раза, скорость распространения волны этих же колебаний – также в два раза. Таким образом, декремент колебаний является наиболее чувствительной к изменению давления прессовки вибрационной характеристикой.

Для оценки устойчивости и характера взаимосвязи исследуемых вибрационных параметров с давлением прессовки (P) полученные характеристики были выражены в виде регрессионных зависимостей (табл.4). В табл.4 также приведены полученные по опытным данным коэффициенты корреляции исследуемых параметров с давлением прессовки.

Обобщение результатов проведённого исследования, во-первых, доказывает принципиальную возможность использования декремента колебаний, резонансной частоты и скорости перемещения волны колебаний для контроля давления прессовки пакета электротехнической стали; во-вторых, подтверждает то, что наиболее чувствительным к изменению давления вибрационным параметром является декремент колебаний, особенно в диапазоне давлений прессовки от 1000 до 2000 кПа (10–20 кГ/см²).

К недостаткам использования декремента колебаний следует отнести ненадёжную воспроизводимость, нелинейный характер зависимости от давления прессовки и более низкий коэффициент корреляции по сравнению с резонансной частотой и скоростью перемещения волны

колебаний. Причины слабой воспроизводимости декрементов колебаний кроются, вероятно, в недостаточном совершенстве технологии выделения резонансного пика на фоне накладывающихся соседних резонансных частот и шумов.

Достоинствами альтернативных вибрационных параметров (резонансной частоты и скорости перемещения волны колебаний) являются устойчивость, линейный характер изменения в зависимости от давления прессовки и высокий коэффициент корреляции. Однако эти параметры отличаются гораздо меньшей чувствительностью к давлению прессовки.

С учетом сказанного наиболее простым, логичным и эффективным решением проблемы выбора параметра для контроля давления прессовки является не предпочтение какого-либо из вибрационных параметров, а совместное их использование, поскольку все они определяются в рамках одной и той же технологии.

Следующим шагом к созданию эффективного и объективного метода контроля технического состояния сердечников статоров турбогенераторов должно быть уточнение полученных регрессионных зависимостей путём исследования более близкой к реальному сердечнику статора физической модели.

Список литературы

1. Пат. 2113754 РФ. Способ контроля прессовки сердечника статора электрической машины / А.В. Григорьев, В.Н. Осотов, Д.А. Ямпольский // Открытия. Изобретения. 1998. № 17.
2. Пат. 2155429 РФ. Способ контроля прессовки сердечника статора электрической машины / А.В. Григорьев, В.Н. Осотов, Д.А. Ямпольский // Открытия. Изобретения. 2000. № 24.
3. Григорьев А.В., Осотов В.Н., Ямпольский Д.А. О вибрационном контроле состояния статора турбогенератора // Электрические станции. 1998. № 4. С. 55–58.
4. Григорьев А.В., Осотов В.Н., Ямпольский Д.А. О вибрационном контроле технического состояния статоров турбогенераторов ТГВ-300 // Электрические станции. 1998. № 8. С.27–35.
5. Григорьев А.В., Осотов В.Н., Семёнов Д.Ю., Ямпольский Д.А. Вибродиагностика статоров турбогенераторов в ОАО "Свердловэнерго" // Изв. вузов. Электромеханика. 1998. № 2–3. С.75–78.
6. Рабинович В.М., Певная Э.М. Характеристика жёсткости шихтованных магнитопроводов электрических машин // Электротехника. 1989. № 5. С.37–39.
7. Вибрации в технике: Справочник. Т.5. Измерения и испытания. М.: Машиностроение, 1981.

Григорьев Анатолий Владимирович – ведущий инженер "Свердловэлектроремонта". Окончил электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института в 1962 г.

Осотов Вадим Никифорович – главный специалист "Свердловэлектроремонта". Окончил энергетический факультет Уральского политехнического института в 1963 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Некоторые аспекты оптимизации системы диагностики силового электрооборудования" в 2001 г. в Уральском государственном техническом университете (УГТУ-УПИ).

Семёнов Дмитрий Юрьевич – инженер "Свердловэлектроремонта". Окончил механико-машиностроительный факультет УГТУ-УПИ в 1995 г. Защитил кандидат-

скую диссертацию по теме "Вибрационная диагностика технического состояния резинотканевых конвейерных лент" в 2000 г. в УГТУ-УПИ.

Ямпольский Дмитрий Анатольевич – доцент кафедры ПТМ УГТУ-УПИ. Окончил механико-машиностроительный факультет Уральского политехнического института в 1985 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Автоматизация расчётов динамической нагруженности упругих конструкций автомобиля при случайных колебаниях" в 1990 г. в Институте машиностроения АН СССР.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя

**СИВКОВ А.А., канд. техн. наук, КОРОЛЬКОВ Л.В. (НИИ высоких напряжений при ТПУ),
САЙГАШ А.С. (ТПУ)**

Обоснована актуальность задачи нанесения медного покрытия на алюминиевые поверхности. Показана возможность использования для этого импульсного магнитоплазменного ускорителя с сильноточным разрядом типа Z-пинч. Экспериментально показана возможность решения проблемы совмещения сильноточной контактной пары Cu-Al и значительного уменьшения ее переходного контактного сопротивления при использовании медного покрытия, нанесенного на алюминиевую поверхность с помощью магнитоплазменного ускорителя.

Проблема уменьшения переходного сопротивления и совмещения электрического контакта меди–алюминий, повсеместно встречающаяся в промышленной электротехнике, общеизвестна. В частности, необходимость ее решения возникла в связи с использованием сильноточных взрывных предохранителей ($I_h = 3,6$ кА, $U_h = 1000$ В) с алюминиевым разрушааемым тоководом для защиты мощных выпрямительных агрегатов с одним диодом Д-273-5000 в плече [1]. В выпрямительных агрегатах внутренние силовые шинопроводы выполняются из меди, а отводящие шинопроводы – из алюминия. Предохранитель, имеющий с одной стороны алюминиевую контактную поверхность, а с другой стороны – поверхность с медным покрытием, является одновременно элементом совмещения контактной пары меди–алюминий. Известно, по крайней мере, два способа совмещения такой контактной пары. При использовании одного из них (биметаллических прокладок) увеличивает-

The actuality of deposition of copper coating on aluminum surfaces was grounded. The opportunity to use for this an impulse magneto-plasma accelerator with the high current discharge such as Z-pinch was shown. The opportunity to solve a problem of combination of high current contact couple Cu-Al and significant decrease in its transitional contact resistance at use of copper coating deposited on the aluminum surface using the magneto-plasma accelerator was experimentally shown.

ся число контактных переходов, что приводит к увеличению переходного сопротивления контакта. Кроме того, биметаллическая прокладка для мощной ошиновки изготавливается по технологии сварки взрывом, что требует создания на промышленном предприятии специализированного производственного участка по ведению взрывных работ. Наиболее приемлемым и эффективным способом решения задач совмещения контакта меди–алюминий и снижения его переходного сопротивления является использование специальной смазки на основе медного порошка. Однако ему присущи такие недостатки как: ухудшение свойств при длительной эксплуатации с циклическими нагрузками и невозможность повторного использования при ревизии контакта.

В настоящей работе предложен новый способ решения этой проблемы – нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью импульсного магнитоплазмен-

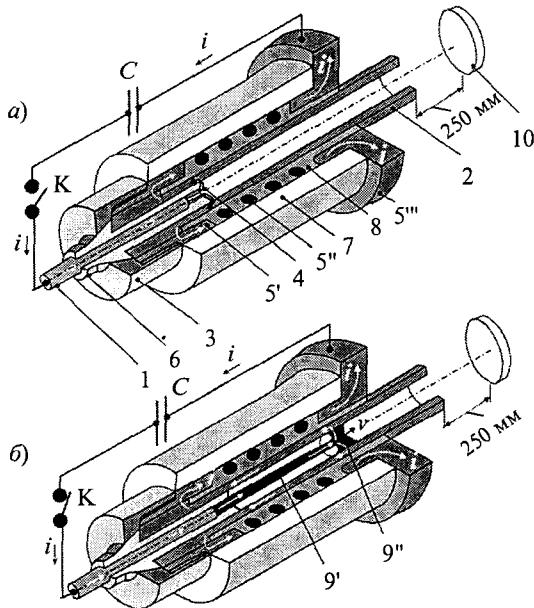


Рис.1. Электрическая схема, устройство и принцип действия технологического импульсного магнитоплазменного ускорителя:

а – исходное состояние; б – работа ускорителя; 1 – центральный электрод; 2 – электрод-ствол; 3 – изолятор центрального электрода; 4 – электровзрывающиеся проводники; 5 – индуктор ($5'$ – контактный цилиндр, $5''$ – соленоид, $5'''$ – контактный фланец); 6 – заглушки; 7 – корпус; 8 – изоляция (стеклэпоксидный компаунд); 9 – плазменная структура сильноточного разряда ($9'$ – плазменный жгут- Z пинч, $9''$ – круговая плазменная перемычка); 10 – мишень-подложка

ного ускорителя (МПУ).

Принципиальная схема установки и устройство технологического ускорителя показаны на рис.1. Основными элементами МПУ являются медные центральный электрод 1 и электрод-ствол 2, разделенные изолятором 3 и в исходном состоянии электрически связанные медными электровзрывающимися проводниками (ЭВП) 4. Узел, собранный из этих элементов, представляет собой классический электродинамический ускоритель с сильноточным разрядом типа Z -пинч (пинч-ускоритель) и устанавливается по продольной оси соленоида $5''$ индукционной системы. Индуктор выполнен заодно из цельной латунной заготовки, состоит из контактного цилиндра $5'$ (казенной части), соленоида $5''$ (3,5 витка) и контактного фланца $5'''$. Удержание электродинамических усилий, действующих на витки соленоида при протекании импульсного тока амплитудой порядка 10^5 А, обеспечивается эпоксидной заливкой 8 витков и прочным цилиндрическим стеклотекстолитовым

корпусом 7 [2]. Электропитание ускорителя осуществляется от емкостного накопителя энергии $C = 48 \cdot 10^3$ Ф при зарядном напряжении $U_{\text{зар}} \leq 2,0$ кВ. Индуктивность разрядного контура составляет $L_k = 10^{-6}$ Гн, включая индуктивность соленоида $L_c = 0,4 \cdot 10^{-6}$ Гн. Обрабатываемый алюминиевый образец-мишень 10 устанавливается на некотором расстоянии от среза ствола ускорителя. Выстрелы проводились в атмосферных условиях.

Технологический цикл ускорения плазменной структуры сильноточного разряда и воздействия гиперзвукового плазменного потока на мишень с нанесением покрытия протекает следующим образом. Емкостной накопитель C заряжается до требуемого уровня напряжения. При замыкании ключа K начинается разряд конденсаторной батареи в обозначенном стрелками контуре (рис.1). Ток разряда увеличивается (рис.2) и при некотором его уровне в момент времени t_1 происходит электрический взрыв медных проводников. Напряжение на электродах ускорителя резко возрастает до уровня, обусловленного длиной и сечением ЭВП, а производная нарастания рабочего тока уменьшается. При оптимальном выборе параметров ЭВП, длины и диаметра газогенерирующего канала в полиэтиленовом изоляторе у вершины центрального электрода [2] обеспечивается дальнейший рост рабочего тока и напряжения дуговой стадии разряда с последующей относительной стабилизацией. Момент t_1 принят за начало работы ускорителя. Начальное формирование плазменной структуры сильноточного разряда типа Z -пинч с круговой плазменной перемычкой, замыкающейся на цилиндрическую поверхность ускорительного канала электрода-ствола, обеспечивается за счет использования газогенерирующего канала (длина и диаметр по 6 мм) и проходящего сквозь него пучка из нескольких медных проволочек (8 проволочек диаметром 0,5 мм), фон-

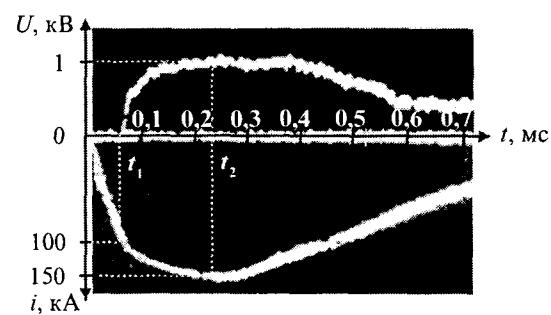


Рис.2. Осциллограммы напряжения на электродах и рабочего тока ускорителя

тальнообразно расходящихся и огибающих торец полиэтиленового изолятора (рис.1) [2]. Кроме того, такая конструкция узла формирования плазменной структуры позволяет задействовать электротермохимический механизм преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию ускоряемой массы на стартовом этапе [3]. Суть его заключается в том, что при контакте плазмы разряда с поверхностью канала происходит интенсивный процесс термического разложения полиэтилена с образованием газообразных продуктов, в составе которых более 10% водорода. Их истечение из газогенерирующего канала и последующее расширение нагретого водорода обеспечивают высокую стартовую динамику ускорения токонесущей плазменной перемычки. Интенсивность электротермохимического процесса может быть значительно увеличена за счет заполнения газогенерирующего канала либо жидким органическим диэлектриком (трансформаторное масло, технический вазелин), либо порошкообразным водородосодержащим веществом (например, гидридом металла) [4]. Заданные таким образом конфигурация плазменной структуры и начальные условия ее устойчивого состояния в дальнейшем поддерживаются азимутальным магнитным полем тока, протекающего по плазменному жгуту-пинчу 9', и внешним аксиальным полем соленоида, векторы сил магнитного давления которых направлены одинаково к оси симметрии коаксиальной системы [5]. При такой форме импульса напряжений и нарастающем рабочем токе (рис.2) ускорительная система обеспечивает высокоэффективный электродинамический разгон круговой плазменной перемычки 9", по аналогии с коаксиальным рельсовым ускорителем. Отличие заключается в том, что в рассматриваемом ускорителе роль центральной направляющей выполняет самоудлиняющийся пинчующийся разряд (рис.1). В момент времени t_2 , определенный с помощью ионизационного датчика на срезе ствола, головная часть плазменной структуры выходит из ускорительного канала. Экспериментальные исследования динамики разгона плазменной структуры разряда проведены по методике регистрации моментов t_2 выхода плазмы из стволов различной длины [6]. Они показали, что разгон происходит по закону, близкому к закону равноускоренного движения на длине ствола $l_{ct} \approx 250 \div 260$ мм при длине соленоида индукционной системы 100 мм. Скорость головной части плазменной перемычки практически линейно достигает примерно

4,5 км/с. Дальнейшее увеличение длины ствола не дает увеличения скорости. Такую же предельную длину имеет и плазменно-эрзационный след на поверхности ускорительного канала, что свидетельствует о существовании оптимальной для конкретных условий "активной" длины ствола пинч-ускорителя. Аналогичные результаты получены при исследовании динамики ускорения твердых тел в таком ускорителе [6]. Отличие заключается лишь в том, что наличие перед плазменной перемычкой твердой стенки (донного торца метаемого тела), ограничивающей расширение токовой оболочки, способствует сохранению в ней высокой плотности тока и обеспечивает условия для высокоэффективной работы силы Лоренца по ускорению на большей длине ствола: около 350 мм. В процессе работы ускорителя в плазменной структуре разряда накапливается не только материал электровзрывающихся проводников, но и материал, эродированный с электродов ускорителя, в основном с поверхности ускорительного канала по всей "активной" длине ствола. Путем взвешивания электрода-ствола до и после одного рабочего цикла установлено, что в рассматриваемых условиях из ускорительного канала выносится около 10,0 г металла. Момент встречи фронта плазменного потока с мишенью регистрировался с помощью установленных на ней контактных и пьезодатчиков. Скорость фронта потока в начале его воздействия на поверхность мишени в указанных условиях оценивается как 2,0–2,5 км/с. При такой скорости потока с плотностью вещества порядка 1 г/см³ следует ожидать пластической деформации, разогрева и плавления поверхностного слоя алюминиевой подложки-мишени [7]. Давление соударения должно превышать 100 кбар и приводить к межмолекулярному взаимодействию. Совокупность этих факторов должна обеспечить возникновение граничного слоя взаимного проникания и перемешивания материала потока, образующего покрытие, и материала подложки. Проведенные эксперименты показали, что в указанных условиях за один цикл наносится медное покрытие на круговую алюминиевую поверхность площадью примерно 8000 мм² (80 см²).

Из алюминиевых подложек с нанесенным медным покрытием были приготовлены образцы вертикального среза со шлифами. Исследования структуры поверхности шлифов проведены на растровом электронном микроскопе Jeol-840 с приставкой Link для рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Установ-



Рис.3. Микрофотографии шлифа вертикального среза алюминиевой подложки с медным покрытием: а – граница покрытие–подложка при увеличении $\times 300$; б – фрагмент граничного слоя с взаимным перемешиванием материалов покрытия и подложки; в – фрагмент с микрокумулятивным эффектом

лено, что толщина покрытия в среднем не менее 100 мкм, структура его однородна и практически не имеет пор. Из микрофотографии на рис.3,а видно, что медное покрытие абсолютно плотно сопрягается с поверхностью алюминиевой подложки. Частицы меди размером до 10 мкм визуально обнаруживаются в подложке на глубине до 50 мкм, что подтверждается и данными РФЭС. На такой глубине в алюминии существует до 1,0% меди, а на линии визуальной границы раздела медь и алюминий смешаны в соотношении 75 и 25%. Характер взаимного перемешивания и сцепления материалов покрытия и подложки в граничном слое отчетливо виден на микрофотографии с большим увеличением (рис.3,б) и может быть объяснен плавлением алюминия. Однако на отдельных участках границы раздела обнаруживаются фрагменты, напоминающие по очертанию микрокумулятивные конфигурации (рис.3,в), аналогичные представленным в [8]. Внедрение микрокумулятивных медных струй в алюминиевую подложку возможно и является механизмом проникания меди на глубину в несколько десятков микрометров. Отсутствие на фотографиях каналов внедрения может быть объяснено несовпадением плоскости среза образца с плоскостями этих каналов. Таким образом, высокая адгезия покрытия обеспечивается за счет образования граничного слоя

взаимного проникания, перемешивания и сцепления материалов покрытия и подложки. Следует отметить, что фронтальная поверхность получаемого рассматриваемым способом покрытия сильно шероховатая. Однако это может иметь позитивное значение при соединении на жатием контактных поверхностей большой площади (порядка 10^3 мм^2) за счет увеличения числа контактных точек.

Из алюминиевых подложек с нанесенным медным покрытием были изготовлены образцы торOIDальной формы с контактными кольцевыми поверхностями площадью 600 мм^2 . Такие же образцы изготовлены из меди и алюминия АД-31. Для проведения сравнительных исследований характеристик и свойств контактных переходов выполнена сборка из четырех образцов, стянутых одним болтом (рис.4) с токоподводящими медными шипами. Таким образом обеспечивались равные усилия сжатия всех контактных элементов и равные условия работы всех сравниваемых контактных переходов: Cu–Al, Al–Cu (с медным покрытием), Cu–Cu. Падения напряжения на контактных переходах снимались непосредственно при подключении проводников измерительных цепей в предельно допустимой близости к контактным поверхностям. Общий

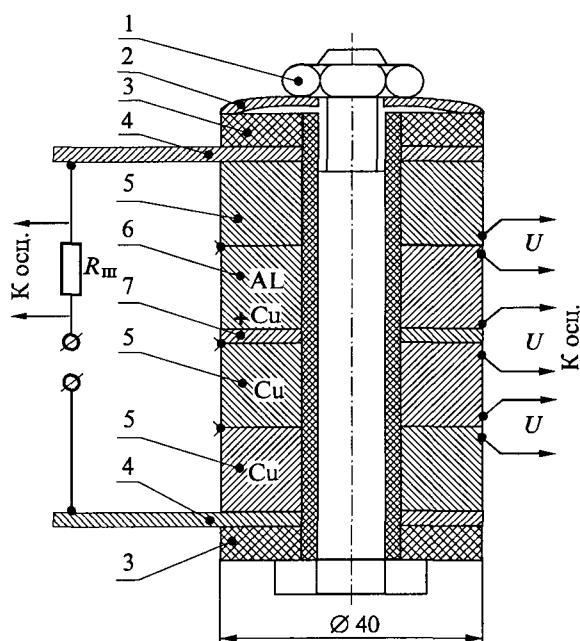


Рис.4. Схема и конструкция контактной сборки для исследования переходного контакта:

1 – стяжной болт с гайкой; 2 – тарельчатая шайба; 3 – стеклотекстолитовые шайбы; 4 – токоподводящие шины; 5 – медные контактные элементы; 6 – алюминиевый контактный элемент с медным покрытием 7; I – ток нагрузки; U – падение напряжения на контактном переходе

ток измерялся с помощью шунта. Температура переходов контролировалась термопарами. Регистрация параметров осуществлялась цифровыми осциллографами С9-8. Исследования проведены в условиях нагружения образцов импульсным током и длительного циклического нагружения переменным током. Импульсный режим создавался разрядом одного молекулярного конденсатора МИГ-100 ($C = 2 \Phi$, $R_{\text{вн}} = 0,05 \text{ Ом}$, $U_{\text{н}} = 100 \text{ В}$).

Амплитуда тока импульса (длительность примерно 10 мс) изменялась от 760 до 1040 А за счет изменения зарядного напряжения конденсатора. В течение одного импульсного нагружения температура переходов остается практически постоянной: около 20°C. Средние значения сопротивления переходов, определенные вольт-амперным способом, при различных токах и одинаковой температуре приведены в таблице.

Контактные переходы	Cu-Al	Cu-Al (с медным покрытием)	Cu-Cu
$R, \text{ мкОм}$	1,83	1,06	0,61

Видно, что сопротивление перехода Cu-Al с медным покрытием в 1,73 раза или на 42% меньше сопротивления обычного перехода Cu-Al. Разница значений сопротивления второго и третьего столбцов таблицы, равная 0,45 мкОм, может быть принята для оценки электрического сопротивления границы перехода между медным покрытием и алюминиевой подложкой. Оно много меньше сопротивления обычного контактного перехода Cu-Al и одного порядка с сопротивлением обычного перехода Cu-Cu. На рис.5 представлены экспериментальные зависимости сопротивления контактных переходов от усилия сжатия, полученные в режиме импульсного нагружения. Видно, что контактная пара Cu-Al (с медным покрытием) менее чувствительна к усилию сжатия по сравнению с обычной контактной парой Cu-Al (кривая 2 более полога, чем кривая 1), вероятно из-за большей твердости алюминиевой поверхности образца с покрытием. Увеличение микротвердости поверхностного слоя металлических образцов после нанесения покрытия рассматриваемым способом установлено экспериментально и обусловлено ударно-волновой модификацией микроструктуры материала [8].

Близкие к реальным условиям длительного нагружения переменным током промышленной частоты создавались с помощью нагрузочного трансформатора. В соответствии с [10] контакт-

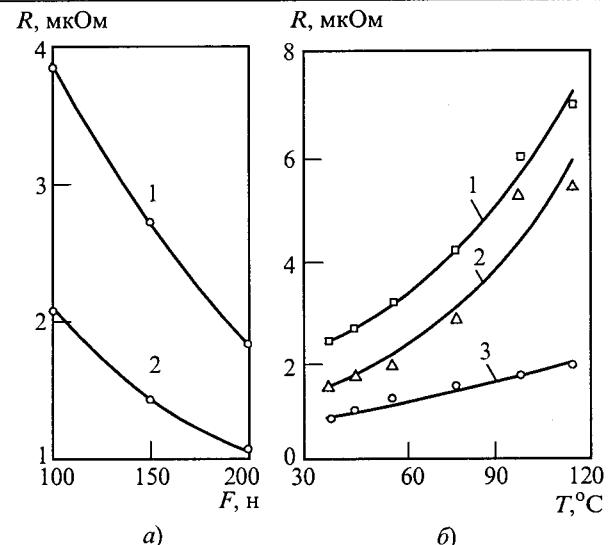


Рис.5. Зависимости сопротивления контактного перехода:

а – от усилия сжатия $R(F)$; б – от температуры $R(T, \text{ }^{\circ}\text{C})$; 1 – для перехода Cu-Al; 2 – для перехода Cu-Al с медным покрытием; 3 – для перехода Cu-Cu

ные элементы сжимались с усилием 230 Н. Ток нагрузки 470 А и плотность тока на контактных переходах устанавливались с учетом требований ГОСТ-434-53. Температура исследуемых образцов устанавливалась на постоянном уровне 50°C через 3 ч после включения тока. Естественный рост температуры образцов под нагрузкой сопровождается увеличением сопротивления контактных переходов. В экспериментах температура образцов доводилась до 115°C как путем подогрева от внешнего нагревателя при постоянном номинальном уровне тока, так и за счет повышения плотности тока сверх номинальной (рис.5). Анализ экспериментальных зависимостей, представленных на рис.5, показывает, что сопротивление контактного перехода Cu-Al более чувствительно к росту температуры, чем перехода Cu-Cu. Однако сопротивление перехода Cu-Al с покрытием на $\Delta R \approx 0,67 \text{ мкОм}$ ниже сопротивления обычного перехода Cu-Al во всем исследуемом температурном диапазоне. Образец контактной пары Cu-Al с медным покрытием подвергался длительным циклическим нагрузкам номинальным током (10 циклов по 12 ч). В перерывах происходило естественное охлаждение сборки до комнатной температуры. При этом не было обнаружено заметного увеличения переходного сопротивления и изменения режима нагрева контактной пары. Более того, изменения не происходили и при охлаждении кон-

тактной пары в перерывах между нагрузочными циклами до -20°C .

Выводы

1. Показана принципиальная возможность создания технологической установки по нанесению медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности в атмосферных условиях на основе импульсного магнитоплазменного ускорителя.

2. Высокая адгезия покрытия и низкое переходное электрическое сопротивление обусловлены глубоким внедрением материала покрытия (медь) в алюминиевую подложку и образованием граничного слоя взаимного перемешивания и сцепления материалов покрытия и подложки.

3. Медное покрытие на алюминиевой контактной поверхности дает возможность решения задач совмещения контактной пары Cu-Al и снижения ее переходного сопротивления. Это обеспечивает повышение надежности контактных соединений и снижение потерь электроэнергии при длительной эксплуатации.

Список литературы

1. Корольков В.Л., Корольков Л.В., Северюхин В.Л. Выпрямительный агрегат нового поколения // Промышленная энергетика. 1997. № 3. С.8.
2. Пат. 2150652 РФ. 7F41B 6100. Коаксиальный ускоритель Сивкова /А.А. Сивков // Открытия. Изобретения. 2000. № 16.
3. Salge G.H., Weise H.G.G., Braunsberger E. a.o. Mass acceleration by plasma pulses // IEEE Trans. on Magnetics. 1989. Vol. 25, № 1. P. 495–499.
4. Будин А.В., Каликов В.А., Коваль А.Н. и др. Получение водорода путем электротермического разложения твердых источников газа. // Письма в ЖТФ. 1994. Т.20, Вып. 6. С.39–42.
5. Bud'ko A.B., Felber F.S., Kleev A.I. a.o. Stability analysis of dynamic Z pinches and theta pinches // Phys. Fluids B. 1989. Vol. 1, № 3. P. 598–607.
6. Сивков А.А. Гибридная электромагнитная система метания твердых тел // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т.42, № 1. С.3–12.
7. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972.
8. Сивков А.А. О возможном механизме "сверхглубокого проникания" микрочастиц в твердую преграду // Письма в ЖТФ. 2001, вып. 16. С.60–65.
9. Афанасьев В.В. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов. Л.: Энергоатомиздат, 1988.

АККУМУЛЯТОРЫ

Пути повышения напряжения топливных элементов¹

СКАЧКОВ Ю.В., доктор техн. наук, проф.,
КОЛОСОВСКИЙ В.В., БЕЛОУСОВ О.А., кандидаты техн. наук

Военно-морской инженерный институт (С.-Петербург)

Рассмотрены некоторые проблемные вопросы получения электрического тока методом "холодного горения" и обозначены пути повышения технических характеристик топливных элементов. На основе подробного анализа электродных процессов определены пути увеличения их скорости изменением условий проведения электрохимических реакций на различных стадиях.

Работа электрохимического генератора (ЭХГ) в целом и отдельных его систем в значительной мере определяется процессами, протекающими в топливных элементах (ТЭ) и характеристиками ТЭ. Поэтому при моделировании ЭХГ для его работы в составе электроэнергетической системы уже на первом этапе необходимо провести анализ работы ТЭ, исследование их

In the article some problem questions of reception of an electric current by a method of "cold burning" are considered and ways of increase of characteristics of fuel elements are designated. On the basis of the detailed analysis of electrode processes ways of increase of their speed by change of conditions of realization of electrochemical reactions at various stages are determined.

основных характеристик, определить возможные пути повышения их напряжения.

При сжигании органического топлива в тепловых двигателях освобождаемая внутренняя энергия хаотично рассеивается в виде тепла, лишь малая часть которого может быть в дальнейшем преобразована в электроэнергию. При осуществлении процесса "холодного горения" освобождаемая внутренняя энергия топлива преобразуется в упорядоченное движение заряжен-

¹ Печатается в порядке обсуждения.

ных частиц – электронов во внешней цепи и ионов в электролите с получением соответствующих продуктов реакции и дополнительно электрического тока. Таким образом, отсутствие в ЭХГ многоступенчатого процесса, протекающего по схеме: *химическая энергия → тепло → механическая работа → электрическая энергия*, т.е. его способность непосредственно преобразовывать энергию активных веществ в электроэнергию, позволяет получать для топливных элементов значения КПД, близкие к 0,75–0,9.

Практический КПД ТЭ ниже максимального КПД из-за поляризации электродов и неполного использования реагентов. Поляризация кислородного электрода значительно выше, чем водородного, что обусловлено большей сложностью процессов при восстановлении кислорода, сопровождающихся образованием промежуточных пероксидных соединений.

Скорость электродного процесса различна на разных участках ТЭ [1].

Электродный процесс всегда включает в себя несколько последовательных стадий. Сначала реагирующее вещество подходит к поверхности электрода, затем протекает электрохимическая реакция, в результате которой происходит обмен электронами между электродом и реагирующими молекулами или ионами, и, наконец, продукты реакции отводятся от электрода. Каждая из стадий при определенных условиях проведения процесса имеет свою предельную скорость. Общая скорость процесса определяется, очевидно, скоростью наиболее медленной из этих последовательных стадий.

Чтобы ускорить электродный процесс, надо выяснить, какая стадия в данных условиях самая медленная и каким закономерностям она подчиняется. Тогда, изменяя условия процесса, можно увеличить его скорость.

На практике встречаются различные случаи. Электрохимическая реакция может протекать с большой скоростью, но вещество медленно подводится к электроду. В этом случае все подходящие к электроду молекулы реагируют практически мгновенно, и общая скорость процесса равна скорости подвода вещества. Иногда медленной стадией может быть отвод продуктов реакции и, наконец, собственно, электрохимическая реакция. В последнем случае концентрация реагирующего вещества около поверхности электрода почти такая же, как в объеме раствора; с электродом сталкивается большое число молекул или ионов, но лишь немногие из них при этом принимают или отдают электроны.

Изменяя условия электродного процесса, можно ускорить самую медленную стадию и тем самым увеличить скорость процесса в целом. Сначала скорость его будет возрастать пропорционально скорости медленной стадии, однако при дальнейшем ускорении этой стадии скорость всего процесса начинает изменяться медленнее скорости замедленной стадии. Это означает, что в изменившихся условиях медленной становится другая стадия процесса, подчиняющаяся другим закономерностям, и для ее ускорения нужно изменять уже другие параметры процесса, например, ускорять диффузию, усиливая перемешивание. Следовательно, чтобы регулировать скорость электродных процессов, получать большие токи, необходимо уметь распознавать замедленные стадии и правильно описать закономерности, которым они подчиняются.

Рассмотрим сначала, как активные вещества подводятся к электродам и каким образом можно ускорить этот процесс. В качестве топлива и окислителя в топливных элементах иногда применяют вещества, заранее растворенные в электролите, но еще чаще используют активные газообразные вещества. Газы при соприкосновении с электролитом растворяются в нем и затем ведут себя как обычные растворенные вещества.

Когда цепь разомкнута, концентрация веществ во всех частях раствора одинакова. При включении тока в результате реакций на электродах одни вещества превращаются в другие, концентрация их возле электродов изменяется и начинается ее выравнивание. Вблизи поверхности электрода всегда есть слой электролита, через который растворенное вещество подходит к электроду путем диффузии. Количество вещества (m), диффундирующее к электроду, прямо пропорционально времени диффузии (t), площади электрода (q), разности концентраций в объеме раствора (C_o) и у поверхности электрода (C) и обратно пропорционально толщине слоя электролита (s), через который происходит диффузия (диффузионный слой):

$$m = Dqt \frac{C_o - C}{s},$$

где D – коэффициент диффузии.

Количество вещества, которое подходит к электроду и реагирует на нем, определяет протекающий через электрод ток. При превращении на электроде 1 моля вещества протекает nF (А·с) электричества. Умножая количество диффундирующего вещества к 1 см² электрода в 1 с на nF , можно найти плотность тока, которую может

обеспечить этот диффузионный процесс:

$$i = nFD \frac{C_o - C}{s}.$$

Меняя условия, можно настолько ускорить собственно электрохимическую стадию процесса, что все молекулы активного вещества, подходящие к электроду, будут мгновенно реагировать. Концентрация вещества вблизи электрода станет равна нулю ($C = 0$), и ток, определяемый только скоростью диффузии, станет предельным для данных условий:

$$i_d = nFD \frac{C_o}{s}.$$

Каким же образом можно увеличивать скорость электродного процесса, если она определяется скоростью диффузии? Очевидно, для этого нужно повышать концентрацию раствора и уменьшать толщину диффузионного слоя. Для увеличения концентрации растворенных газов надо повысить их давление. Толщину диффузионного слоя можно уменьшить перемешиванием раствора, но этот способ обычно не применяется в топливных элементах из-за конструктивных трудностей и больших затрат энергии на перемешивание. На практике для повышения мощности топливного элемента важно увеличить не только плотность тока, но и общий ток, снимаемый с электрода. Это можно сделать, не изменяя плотности тока, а увеличив площадь, на которой протекает электродный процесс.

Напряжение топливного элемента определяется разностью потенциалов электродов, значение которых зависит от концентрации активных веществ возле поверхности электродов. На приэлектродную концентрацию вещества в свою очередь влияет скорость диффузии и значение протекающего тока. Эту концентрацию можно определить, зная величины, характеризующие скорость диффузии:

$$C = C_o \left(1 - \frac{i}{i_d}\right).$$

Подставим это выражение в уравнение Нернста, связывающее потенциал электрода с концентрацией реагирующего вещества:

$$\varphi = \varphi^\circ + \frac{RT}{nF} l_n C.$$

(Уравнение Нернста записано в таком виде с учетом того, что на потенциал влияет концентрация одного вещества или концентрация других веществ практически не изменяется). В результате мы получим связь между плотностью

тока, отбираемого от электрода, и смещением потенциала от его первоначального значения:

$$\Delta\varphi = \frac{RT}{nF} l_n \left(1 - \frac{i}{i_d}\right).$$

Изменение потенциала при протекании тока есть поляризация электрода. Концентрационная поляризация вызывается изменением концентрации реагирующего вещества.

При включении тока потенциал водородного электрода становится более положительным, а потенциал кислородного электрода сдвигается в отрицательную сторону. Разность потенциалов уменьшается, т.е. уменьшается напряжение на топливном элементе. Это смещение потенциалов или непроизводительная потеря энергии внутри топливного элемента вызывается необходимостью ускорить диффузию активных веществ. Мощность, равная произведению концентрационной поляризации на ток, расходуется на выделение тепла внутри топливного элемента.

Чем больше снимаемый с электрода ток, чем ближе он к предельному, тем сильнее смещается потенциал электрода. Когда ток достигает предельного значения, потенциалы электродов в элементе настолько сближаются, что напряжение становится почти равным нулю. Если последовательно с таким элементом включен другой, более мощный элемент, то с его помощью можно еще сильнее сдвинуть потенциалы электродов в исследуемом элементе, увеличивая ток в цепи. При этом электроды изменят свою полярность (положительный электрод станет отрицательным, а отрицательный – положительным), т.е. происходит переполюсовка топливного элемента. Это явление может наблюдаться в батарее из последовательно включенных элементов, когда большая часть топливных элементов работает нормально, а в один или несколько элементов по каким-либо причинам ухудшилась подача активных веществ.

Своевременно не устраниенная переполюсовка приводит обычно к значительному снижению напряжения и дальнейшему выходу из строя всей батареи.

Применение электродов, обладающих катализитическими свойствами, увеличивает скорость протекающих в них электрохимических процессов (явление электрокатализа). Например, молекулы водорода на поверхности платины распадаются на атомы, которые с гораздо большей скоростью превращаются в ионы водорода, чем молекулы водорода на других электродах, где распада на атомы не происходит. То же самое

можно сказать об электрохимическом восстановлении кислорода, но только этот процесс сложнее и протекает несколькими параллельными путями.

На активных электродах-катализаторах, какими являются металлы платиновой группы, окисляются даже очень прочные молекулы углеводородов (этан, пропан и др.) и аммиака, что даёт в перспективе возможность их использования в качестве топлива в ЭХГ.

В отличие от химических для электрохимических реакций есть ещё один способ воздействия на энергию активации – изменение потенциала. В этом заключается важнейшая особенность электрохимических реакций: в определенных пределах можно очень тонко изменять потенциал электрода, изменения таким образом энергию активации:

$$\Delta W = -\beta F \Delta \phi,$$

где β – коэффициент, колеблющийся в пределах 0–1; ΔW – изменение энергии активации; $\Delta \phi$ – изменение потенциала электрода.

Если в уравнении скорости химической реакции изменение энергии активации заменить величиной, выраженной через потенциал электрода, получится уравнение, связывающее скорость электрохимического процесса (плотность тока) с потенциалом (уравнение Тафеля):

$$i = K C e^{(\beta F \Delta \phi / RT)}.$$

Таким образом, если наиболее медленной является электрохимическая стадия электродного процесса, то скорость процесса по мере изменения потенциала меняется экспоненциально. Но, как видно из уравнения Тафеля, при приближении тока к нулю потенциал должен бесконечно смещаться, что не имеет физического смысла. В действительности же с приближением тока к нулю потенциал электрода приближается к своему равновесному значению. Это несоответствие между кинетическим уравнением и физическим смыслом объясняется следующим образом. Результирующая скорость какой-либо реакции всегда представляет разность между скоростью прямого и обратного процессов. При этом равновесие наступает, когда скорости прямого и обратного процессов сравниваются. Ток, соответствующий равным скоростям прямой и обратной реакций (ток обмена), равен скорости обмена между веществом в растворе и на поверхности электрода. Его можно непосредственно измерить с помощью меченых атомов.

Смещая потенциал от равновесного значения,

мы ускоряем одну из реакций. Например, при сдвиге потенциала водородного электрода в положительную сторону ускоряется реакция окисления молекул водорода, в то время как обратная реакция продолжается с прежней скоростью. Теперь уже разность между скоростями прямой и обратной реакций не равна нулю, и эта разность обеспечивает протекание тока во внешней цепи. Когда этот ток намного превышает ток обмена, скорость обратной реакции можно пренебречь и считать, что результирующая скорость равна скорости прямой реакции. При внешнем токе, близком к току обмена, скорость обратной реакции пренебречь нельзя. Если скорость обратной реакции изменяется тоже по уравнению Тафеля, получим, что потенциал электрода вблизи равновесия изменяется по закону:

$$\Delta \phi = \frac{RT i}{F i_o},$$

где i – плотность тока во внешней цепи; i_o – плотность тока обмена.

Ток обмена водорода на платиновом электроде настолько велик, что, немного сдвинув потенциал водородного электрода, можно получить от него большой ток во внешней цепи. При кислородной же реакции ток обмена очень мал, и потенциал требуется смещать гораздо сильнее, чтобы получить такой же ток, как на водородном электроде. В растворе всегда присутствует какое-то количество примесей посторонних веществ, которые тоже могут реагировать на электродах. В тех случаях, когда ток обмена основной реакции очень мал, потенциал электрода могут определять электрохимические реакции, вызванные присутствием примесей в растворе.

Из кинетических уравнений химических и электрохимических реакций видно, что скорость реакций очень сильно зависит от температуры. Поэтому часто для увеличения скорости процессов в топливных элементах повышают рабочую температуру. Верхний предел температуры ограничивается либо стойкостью применяемых катализаторов или конструкционных материалов, либо температурой кипения электролита. Чтобы поднять рабочую температуру топливных элементов значительно выше 100°C, необходимо повышать давление над электролитом или применять в качестве электролитов очень концентрированные растворы и даже расплавленные соли [2].

Следовательно, на практике могут быть применимы следующие способы повышения напря-

жения топливных элементов [2]:

- снижение тока нагрузки;
- уменьшение поляризации электродов за счет применения катализаторов и пористых электродов оптимальной структуры; повышения температуры, концентрации (давления) реагентов, принудительного подвода топлива и окислителя;
- снижение омических потерь за счет сниже-

ния расстояния между электродами, применения электролита с высокой удельной электрической проводимостью, улучшения контакта токоотводов с электродами.

Список литературы

1. Паланкер В.Ш. Холодное горение. М.: Наука, 1972.
2. Белоусов О.А., Веселов В.Б. Использование электрохимических генераторов на ПЛ. Палдиски: НТО в/ч 10575, арх. № 15832-4/94, 1989.

Влияние температуры на поляризационное сопротивление герметизированных свинцовых аккумуляторов

БАЮНОВ В.В., БАРСУКОВА М.М., ПОДАЛИНСКИЙ Ю.А., КОЛИКОВА Г.А.

ОАО «НИАИ «Источник» (С.-Петербург)

Изучено влияние температуры на поляризационное сопротивление герметизированного свинцового аккумулятора при различных режимах разряда.

Характерной тенденцией развития свинцовых аккумуляторов является стремление по возможности упростить и удешевить их обслуживание в период эксплуатации. Это достигается герметизацией свинцовых аккумуляторов. Одной из особенностей герметизированных свинцовых аккумуляторов (ГСА) является использование в них иммобилизованного электролита – гелеобразного или абсорбированного микропористым стекловолокном. Оба способа иммобилизации обеспечивают высокую скорость переноса кислорода к отрицательному электроду, где происходит его рекомбинация [1].

При проектировании ГСА особый интерес представляет возможность определения основной характеристики аккумулятора – изменения напряжения U в зависимости от снятой емкости Q или длительности разряда для различных режимов разряда. В технической документации на ГСА эта характеристика приводится только для температуры 20°C. Для практического применения ГСА требуется изучение его поведения при эксплуатации в более широком диапазоне температур, в том числе отрицательных.

Напряжение свинцового аккумулятора U зависит от ЭДС (или НРЦ – напряжения разомкнутой цепи) аккумулятора E , силы тока I , активного R_a и поляризационного R_p сопротивлений:

$$U = E - I(R_a + R_p). \quad (1)$$

Активное сопротивление R_a и его составляющие для проектируемого ГСА определяют расчетным путем. НРЦ (E) можно определить, если известно изменение плотности электролита в порах электродов для различных режимов разряда выбранного прототипа аккумулятора.

Поляризационное сопротивление R_p для положительного и отрицательного электродов, состоящее из сопротивлений перехода R_{pp} , реакции R_p , диффузии R_d , кристаллизации R_k можно определить для малых плотностей тока при равновесном потенциале, когда зависимость между током и поляризацией прямолинейная [2].

На основании теории пористого электрода в [3] были предложены зависимости для теоретического расчета разрядных кривых свинцового аккумулятора с жидким электролитом. Однако, по мнению автора, их надежность и точность ограничены в связи с тем, что не учитываются изменения структуры пор электродов в процессе разряда, а также снижение концентрации H_2SO_4 в порах, что имеет место при реальной работе аккумулятора. Последнее особенно важно при рассмотрении разряда положительного электрода, равновесный потенциал которого приблизительно пропорционален логарифму концентрации H_2SO_4 . С учетом данных обстоятельств использовать предложенные в [3] зависимости для расчета поляризационного сопро-

тивления свинцового аккумулятора для различных режимов разряда затруднительно, тем более для проектируемого герметизированного свинцового аккумулятора, условия работы электродов которого существенно отличаются от рассмотренных в [3].

В данной работе поляризационное сопротивление предлагается определить на прототипе проектируемого ГСА экспериментальным путем. Во время разряда ГСА различными токами периодически при различной степени разряженности определяется НРЦ (E), рассчитываются плотность электролита в порах электродов и разность плотностей электролита в сепарации и порах электродов. По этим параметрам определяются соответствующие значения поляризационного сопротивления. В [4] по данной методике была определена плотность электролита в порах электродов стационарного аккумулятора с жидким электролитом во время разряда различными режимами при температуре 20°C.

В данной работе экспериментальные исследования проводили на герметизированных аккумуляторах СГ-6 с абсорбированным электролитом плотностью 1,280 г/см³ при температуре -10, +20 и +45°C. Замеры НРЦ (E) и напряжения U проводили во время разряда аккумуляторов токами 0,1C; 0,2C; 0,4C; 1C; 3C A (C – номинальная емкость 20-часового разряда) после снятия 25, 50, 75 и 100% емкости. Разряды заканчивали при конечном напряжении, соответствующем требованиям технической документации.

Результаты исследований и расчетов представлены на рис.1 и 2 в виде зависимостей разности плотностей электролита в сепарации и порах электродов аккумулятора ΔP от температуры T для указанных режимов разряда при степени разряженности 100 и 25% (рис.1) и степени разряженности 75 и 50% (рис.2).

Приведенные на рис.1 и 2 данные свидетельствуют о том, что для всех режимов разряда и для всех степеней разряженности разность плотностей электролита в сепарации и порах электродов ΔP увеличивается с понижением температуры от +45 до -10°C. Интенсивность увеличения ΔP возрастает при более низких температурах. В указанном интервале температур при токе разряда 3C A и степени разряженности 100 и 25% разность ΔP возрастает соответственно в 1,3 и 3,2 раза, а при токе 0,1C A – соответственно в 2,9 и 5 раз.

При одинаковой температуре ΔP возрастает с увеличением тока разряда и степени разряженности аккумулятора. Так, при температуре

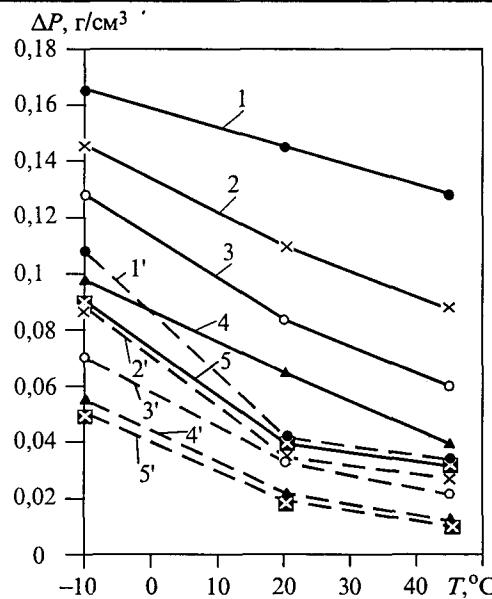


Рис.1. Изменение разности плотностей электролита в сепарации и порах электродов ГСА ΔP в зависимости от температуры T при различных режимах разряда и степени разряженности 100% (1–5) и 25% (1'–5') при токе разряда:

1, 1'–3C A; 2, 2'–1C A; 3, 3'–0,4C A; 4, 4'–0,2C A; 5, 5'–0,1C A

+45°C с увеличением тока разряда от 0,1C до 3C A при степени разряженности 100 и 0,25% ΔP увеличивается соответственно в 4,1 и 3,3 раза, а при -10°C соответственно в 1,5 и 2,1 раза (рис.1).

Увеличение значений ΔP при понижении температуры связано, в основном, с увеличением

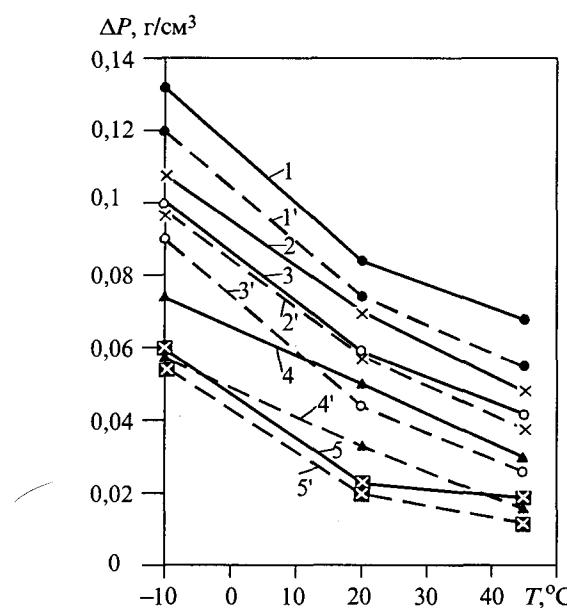


Рис.2. То же, что и на рис.1, но при степени разряженности 75% (1–5) и 50% (1'–5')

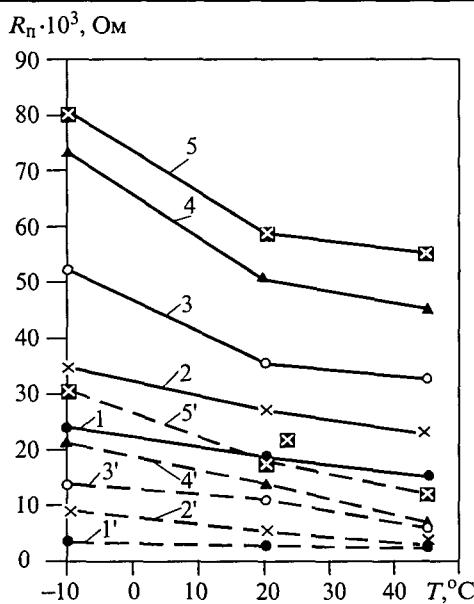


Рис.3. Зависимость сопротивления поляризации R_p ГСА от температуры T при различных режимах разряда и степени разряженности 100% (1-5) и 25% (1'-5')

вязкости электролита и уменьшением коэффициента диффузии.

На основании полученных экспериментальных данных были определены поляризационные сопротивления R_p для указанных токов разряда (0,1C–3C A) в диапазоне температур от -10 до +45°C при степени разряженности 100 и 25% (рис.3) и степени разряженности 75 и 50% (рис.4). Из рис.3, 4 видно, что с уменьшением температуры электролита от +45 до -10°C поляризаци-

онное сопротивление R_p герметизированного свинцового аккумулятора с абсорбированным электролитом при всех режимах разряда увеличивается. Максимальный рост сопротивления поляризации ГСА наблюдается при длительном разряде током 0,1C A, когда в реакции принимают участие глубинные слои активных масс (кривые 5, 5' на рис.3 и 4). При коротких режимах разряда сопротивление поляризации ГСА в указанном диапазоне температур меняется не значительно (кривые 1, 1' на рис.3, 4), что свидетельствует о работоспособности ГСА в области отрицательных температур. С увеличением степени разряженности поляризационное сопротивление возрастает. Так, при температуре -10°C R_p возрастает при увеличении степени разряженности от 25 до 100% при токе разряда 0,1C A в 9 раз, а при токе разряда 3C A – в 2,7 раза.

Для проектируемого аккумулятора поляризационное сопротивление R_p определяют по данным рис.3 и 4 или аналогичным данным для выбранного прототипа аккумулятора с использованием метода моделирования по геометрической поверхности электродов. Таким образом, представленные на рис.1–4 данные позволяют построить зависимости $U = f(Q)$ для всех режимов разряда в интервале температур от -10 до +45°C. В случае необходимости построения зависимости $U = f(Q)$ при более низких температурах (-20 и -30°C) для получения необходимых данных можно использовать метод экстраполяции зависимостей, приведенных на рис.1–4.

Для проверки предложенного метода расчета и построения разрядных кривых были рассчитаны разрядные характеристики аккумулятора СГ-10. Погрешность между расчетными и фактическими данными составила не более 2%.

Выводы

1. Изучено влияние температуры в интервале от -10 до +45°C на разность плотностей электролита в сепарации и порах электродов и на поляризационное сопротивление герметизированного свинцового аккумулятора СГ-6 при разряде токами 0,1C–3C A.

Полученные данные могут быть использованы при проектировании аналогичных герметизированных аккумуляторов с абсорбированным электролитом.

Список литературы

1. Агуф И.А., Центер Б.И., Мрга И., Мицки К. Проблема герметизации свинцового аккумулятора // Электротехническая промышленность. Сер. Источники тока. М.: Информэлектро, 1989. С.1–28.

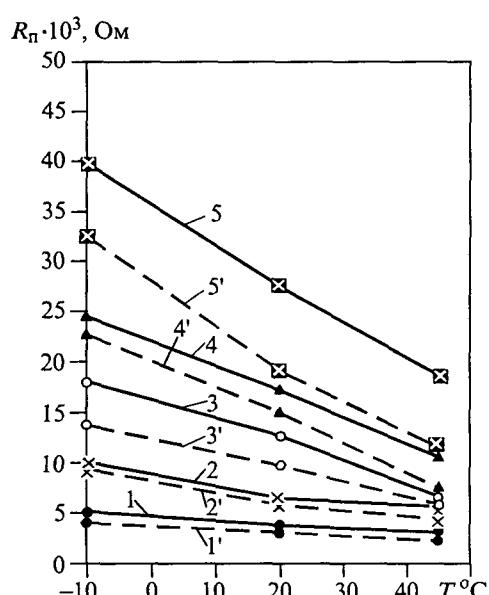


Рис.4. Зависимость сопротивления поляризации R_p ГСА от температуры T при различных режимах разряда и степени разряженности 75% (1-5) и 50% (1'-5')

2. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М.: Химия, 1967.
3. Агуф И.А. Некоторые вопросы теории пористого электрода и процессы, протекающие в свинцовом аккумуляторе // Сборник работ по химическим источникам тока. Л.: Энергия, 1968. Вып. 3. С. 87–100.
4. Хализов И.Ф., Баюнов В.В., Коликова Г.А. Изменение электродвижущей силы во время разряда стационарных и тяговых свинцовых аккумуляторов // Электротехника. 2002. Вып. 6. С. 62–64.

Влияние некоторых органических расширителей на характеристики отрицательного электрода свинцового аккумулятора

КРИВЧЕНКО Г.В., ЮДИЛЕВИЧ С.Р., КОЛИКОВА Г.А.

ОАО "НИАИ "Источник" (С.-Петербург)

Изучено влияние органических расширителей на разрядную емкость и зарядный потенциал отрицательного электрода свинцового аккумулятора.

Одним из основных факторов, определяющих срок службы свинцового аккумулятора, является работоспособность отрицательного электрода, особенно при разрядах высокими плотностями тока. Необходимым условием, обеспечивающим нормальную работу отрицательного электрода, является наличие в активной массе последнего противоусадочных добавок – расширителей. Их выбор, количественный состав особенно важны для аккумуляторов с длительным сроком службы, в частности стационарных аккумуляторов. Подбор добавок осуществляется в основном эмпирически, поскольку нет четких представлений о характере влияния добавок на кинетику процессов, протекающих на свинцово-сульфатном электроде.

Имеющиеся в литературе данные об используемых в аккумуляторной промышленности органических расширителях (гуминовая кислота, дубитель № 4, дубитель БНФ, лигносульфонат натрия) свидетельствуют об адсорбционном характере действия этих органических веществ [1, 2]. Указанные поверхностно-активные вещества (ПАВ) адсорбируются на свинце и сульфате свинца в области потенциалов, реализующихся на свинцовом электроде. Образование сульфата свинца во время разряда тормозит процесс анодного растворения свинца, что приводит к уменьшению разрядной емкости электрода. Поскольку сульфат свинца имеет диэлектрическую природу, основной характеристикой проницаемости пассивирующего слоя является его пористость. Адсорбция ПАВ на поверхности элект-

рода изменяет скорость образования зародышей $PbSO_4$, увеличивается пористость сульфатной пленки, меняется её структура. В результате происходит увеличение поверхности и объемной пористости свинцового электрода. По данным одних авторов, увеличение удельной поверхности отформированного электрода с расширителем БНФ составляет 20–30%, увеличение объемной пористости 3% по сравнению с электродом, где отсутствует органический расширитель [3]. По другим источникам, увеличение удельной поверхности электрода с расширителем БНФ составляет 50%, объемной пористости 10% [4].

В настоящее время в качестве расширителя широко используется дубитель БНФ в сочетании с сульфатом бария. Синтетический дубитель БНФ является продуктом конденсации фенолов и β -нафтолсульфокислоты с формалином. Он обладает стабильным составом и более стабильными свойствами в отличие от природного расширителя дубителя № 4. Сульфат бария играет в активной массе отрицательного электрода роль своеобразного "депо" для органических веществ, которые адсорбируются на кристаллах сульфата бария и постепенно поступают в зону кристаллизации сульфата свинца, разрыхляя сульфатную пленку [5].

Многолетний опыт эксплуатации аккумуляторов типа СН (стационарные намазные), в которых в качестве органической составляющей расширителя применен дубитель БНФ, подтвердил целесообразность и надежность его применения в стационарных аккумуляторах. Так, по

данным эксплуатации срок службы аккумуляторов ряда СН72–СН1152, разработанных НИАИ, составил 12–15 лет. Однако в связи с возникшими в последнее время трудностями с поставкой БНФ начались поиски возможных равноценных заменителей указанного расширителя. В результате этих поисков предприятиям аккумуляторной промышленности был предложен новый органический расширитель [6], диспергатор ФС [7], применяемый также, как и БНФ, в сочетании с сульфатом бария.

По мнению авторов [6] расширитель ФС может заменить серийный расширитель БНФ в стартерных АБ, поскольку батареи с расширителем ФС удовлетворяют требованиям стандарта по разрядной емкости на 20-часовом и стартерном режимах разряда. Вводится ФС в количестве 0,4–0,5% массы свинцового порошка, т.е. в 2 раза больше, чем БНФ. Он изготавливается из компонентов красильного производства и, по мнению авторов, его свойства аналогичны свойствам расширителя – венисперса, применяющегося за рубежом, но значительно дешевле последнего. Венисперс (Vanisper A – торговое название органического расширителя) является лигносульфатом натрия, который получают исключительно из древесины медленно растущей норвежской сосны. По мнению авторов [8], он адсорбируется на частицах свинца при заряде и способствует образованию более пористой пленки сульфата свинца.

В связи с разработкой нового ряда стационарных аккумуляторов с длительным сроком службы типа ТБ350–ТБ600 встал вопрос о выборе органического расширителя для отрицательного электрода. Отсутствие сравнимых данных по эффективности расширителей ФС и БНФ не позволило сделать однозначный выбор.

Целью настоящей работы является изучение влияния органического расширителя ФС на характеристики отрицательного электрода в сравнении с расширителем БНФ в условиях, аналогичных работе стационарного аккумулятора.

При изготовлении отрицательного электрода свинцового аккумулятора органические вещества БНФ и ФС вводятся в пасту в виде водных растворов. Химический анализ водных растворов показал, что в области применяемых в технологии концентраций растворимость обоих расширителей достаточно высокая, однако скорость растворения ФС больше. Опытные электроды, изготовленные в соответствии с технологией, принятой в производстве стационарных свинцовых аккумуляторов, имели в своем соста-

ве следующие расширители [9]:

№ 1 – 0,8% BaSO_4 ;

№ 2 – 1,2% BaSO_4 ;

№ 3 – 0,8% BaSO_4 + 0,35% БНФ;

№ 4 – 0,8% BaSO_4 + 0,50% ФС.

Второй вариант, с увеличенным количеством сульфата бария (1,2%), принят с целью возможной компенсации отсутствующей органической составляющей расширителя в составе активной массы аналогично тому, как это применяется в аккумуляторах типа СК.

Согласно технологии процесс формирования электродов происходит в разбавленном 10%-ном растворе серной кислоты. Химический анализ электролита после окончания процесса формирования показал, что количество органических веществ при использовании расширителя ФС в 3 раза больше по сравнению с вариантом, где в качестве расширителя использовался БНФ, в то время как в исходных материалах количество ФС больше, чем БНФ в 1,4 раза. Данный факт свидетельствует о том, что в процессе формирования часть расширителей БНФ и ФС переходит из активной массы в электролит, причем ФС растворяется в большей степени.

Макеты свинцовых аккумуляторов, в которых отрицательные электроды имели в своем составе указанные расширители, испытывались методом непрерывного циклирования. Электролитом служил раствор серной кислоты плотностью 1,240 г/см³ (33% раствор). Разряды, т.е. превращение $\text{Pb} \rightarrow \text{PbSO}_4$, проводились токами различной плотности от 0,42 А·дм⁻² до 4,2 А·дм⁻² (от 10- до 0,25-часового режима разряда) в соответствии с требованиями, предъявляемыми к стационарным свинцовым аккумуляторам. Потенциалы измерялись относительно кадмевого электрода, стандартный потенциал которого $E_0 = -0,40$ В.

Результаты испытаний электродов при разрядах малыми плотностями тока 0,42 А·дм⁻² (10-часовой режим разряда) представлены на рис.1, откуда видно, что емкость электродов в отсутствии органических расширителей с одним сульфатом бария резко снижается уже в начале циклирования. Емкость электродов с сульфатом бария и органическими составляющими расширителя на всем протяжении циклирования остается достаточно стабильной. Полученные данные свидетельствуют также о том, что емкость электродов с расширителем БНФ на 5–10% выше емкости электродов, в которых применен расширитель ФС.

При разрядах токами более высокой плотно-

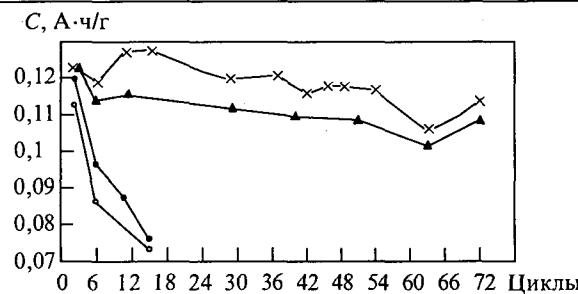


Рис.1. Изменение разрядной ёмкости отрицательного электрода с различными расширителями в процессе циклирования при $i_p = 0,42 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$:

— ○ — расширитель 0,8% BaSO₄; — ● — 1,2% BaSO₄;
— × — 0,8% BaSO₄ + 0,35% БНФ; — ▲ — 0,8% BaSO₄ +
+ 0,50% ФС

сти, когда действие органических добавок проявляется в большей степени, разница в ёмкости между электродами с БНФ и ФС увеличивается. Так, на 0,25-часовом режиме разряда ёмкость электродов с расширителем БНФ на 15–20% больше ёмкости электродов с расширителем ФС. Разрядные кривые при плотности тока $4,2 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$ (0,25-часовой разряд) свидетельствуют о том, что преимущество расширителя БНФ перед ФС сохраняется на протяжении всего периода испытаний (рис.2, разряды № 12 и № 66).

В процессе циклирования также контролировался конечный зарядный потенциал (КЗП) отрицательного электрода. Кривая изменения конечного зарядного потенциала электрода с расширителем БНФ имеет плавный характер и расположена выше, в то время как на кривой с расширителем ФС на начальных циклах наблюдается довольно резкий спад (рис.3): в течение первых 20 циклов снижение КЗП составило при-

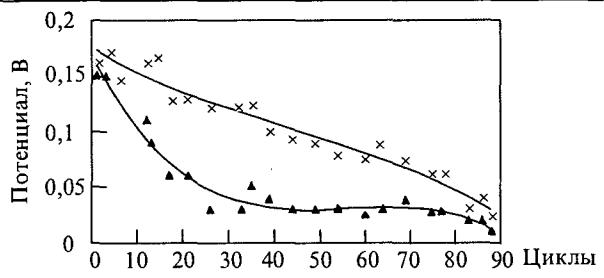


Рис.3. Изменение конечного зарядного потенциала отрицательного электрода в процессе циклирования:

— × — расширитель 0,8% BaSO₄ + 0,35% БНФ;
— ▲ — расширитель 0,8% BaSO₄ + 0,50% ФС

мерно 100 мВ, в дальнейшем изменение потенциала незначительно.

Конечная стадия заряда свинцового электрода практически соответствует восстановлению ионов водорода $\text{H}^+ + \text{e} \rightarrow 1/2 \text{ H}_2$. В начале циклирования КЗП отрицательного электрода составляет $-0,15\text{--}0,18 \text{ В}$ (относительно Cd-электрода) (рис.3). В отличие от основного процесса — превращения сульфата свинца в металлический свинец $\text{Pb}^{2+} + 2\text{e} \rightarrow \text{Pb}$, который протекает во всем объеме пористого электрода, восстановление ионов водорода происходит в тонком поверхностном слое. Поверхностно-активные вещества, находящиеся в приэлектродном слое, могут оказывать влияние на потенциал реакции $\text{H}^+ + \text{e} \rightarrow 1/2 \text{ H}_2$, иными словами на перенапряжение выделения водорода. В [2] установлено, что введение БНФ повышает потенциал отрицательного электрода, вызывает рост перенапряжения выделения водорода. Возможно, данный факт обусловил до некоторой степени более высокое расположение кривой изменения КЗП электрода с расширителем БНФ по отношению к кривой с расширителем ФС.

Расширители БНФ и ФС являются веществами, хорошо растворимыми в сернокислотном электролите. Учитывая, что ФС значительно более растворим, а его исходная концентрация в активной массе на 40% превышает концентрацию БНФ, можно предположить, что в поверхностном слое электрода на границе электрод–электролит содержание расширителя ФС оказалось достаточно высоким, что привело к более интенсивному развитию внешней поверхности электрода. Вследствие этого произошло снижение плотности тока и конечного зарядного потенциала электрода на начальных циклах. В течение 20–25 циклов значительное количество расширителя ФС перешло из активной массы в

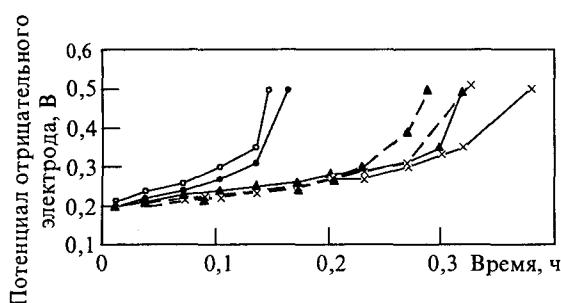


Рис.2. Разрядные кривые Е – t отрицательного электрода при $i = 4,2 \text{ A} \cdot \text{dm}^{-2}$:

— ○ — расширитель 0,8% BaSO₄; — ● — 1,2% BaSO₄;
— × — 0,8% BaSO₄ + 0,35% БНФ; — ▲ — 0,8% BaSO₄ +
+ 0,50% ФС; — — — разряд № 12; — — — разряд № 66

электролит и затем произошло его окисление на положительном электроде.

У электродов с расширителем БНФ процесс перехода расширителя из активной массы к внешней поверхности электрода, а затем в электролит, по-видимому, протекает менее интенсивно. Благодаря этому происходит постепенное изменение конечного зарядного потенциала на протяжении всего периода испытаний.

Снижение емкости отрицательного электрода при циклировании объясняется, по-видимому, динамикой миграции расширителя из активной массы в электролит. Вследствие более быстрого сокращения запаса ФС в объеме активной массы, его эффективность также снижается, что и проявилось в опережающем по сравнению с БНФ уменьшением ёмкости отрицательного электрода.

Осмотр электродов после испытаний показал, что отрицательная активная масса с расширителем БНФ в меру разбухла, что наблюдалось и ранее.[3]. На поверхности электродов, содержащих ФС, наблюдались усадочные пятна, свидетельствующие об уменьшении активной поверхности электрода, связанном, по-видимому, с уменьшением концентрации ФС в порах активной массы и, следовательно, с меньшей эффективностью данного расширителя по сравнению с БНФ.

Совокупность полученных данных свидетельствует о нецелесообразности использования расширителя ФС для изготовления стационарных аккумуляторов с длительным сроком службы.

Выводы

1. Органические расширители БНФ и ФС являются депассиваторами свинцового электрода,

существенно повышают разрядную ёмкость по сравнению с добавкой одного сульфата бария. Увеличение содержания сульфата бария в 1,5 раза не компенсирует отсутствие органических веществ.

2. Расширитель ФС является менее эффективным по сравнению с дубителем БНФ, особенно при разрядах высокими плотностями тока.

3. Учитывая повышенную растворимость расширителя ФС и его меньшую эффективность по сравнению с БНФ, использование расширителя ФС при изготовлении стационарных аккумуляторов нецелесообразно.

Список литературы

1. Лызлов Н.Ю., Агуф И.А. К вопросу о влиянии некоторых ПАВ на процесс образования и структуру пассивирующих сульфатных плёнок на свинцовом электроде // Сборник работ по ХИТ. Л., 1978. С.10.
2. Ожиганова Н.Н., Агуф И.А., Дасоян М.А. Изучение адсорбции некоторых органических веществ на свинцовом электроде импедансным методом // Сборник работ по ХИТ. Л., 1976. С.3.
3. Маноим Г.И. Исследования в области технологии изготовления сухозаряженных свинцовых аккумуляторов: Автореферат канд. дис. Л.: ЛТИ, 1971.
4. Русин А.И., Егоров В.И. и др. Влияние поверхностно-активных веществ на характеристики отрицательного электрода свинцового аккумулятора // Сборник работ по ХИТ. Л., 1993. С.10.
5. Дасоян М.А., Агуф И.А. Современная теория свинцового аккумулятора. Л., 1975.
6. Барковский В.И., Мальчевская Т.Н. Расширитель для отрицательного электрода свинцового аккумулятора // Электрохимическая энергетика: Тезисы докладов III Всесоюзной научной конференции. М., 1989. С.136.
7. Диспергатор ФС ТУ 6-38-05800 142-298-0-99.
8. Szava G.J. Role of the organic expander in modern lead/acid batteries//J. of Power Sources. 1988. Vol. 23, № 1-3. P. 119.
9. ОСТПП. Аккумуляторы и батареи аккумуляторные кислотные. Электроды. Изготовление РД 1614.656-89.

Новый тип резонансного инвертора

ДИЗЕНДОРФ Э.А.

Предложен новый тип резонансного инвертора напряжения, в котором в качестве переключающего элемента использован нелинейный дроссель. Приведена работоспособность инверторов на действующих макетах.

Инверторы напряжения достаточно широко применяются в электротехнических приложениях. Существуют различные схемы подобных устройств [1]. Все они, как правило, обеспечивают необходимый коэффициент преобразования при достаточно высоком КПД. В данной работе предлагаются новые схемы инверторов [2], отличающиеся улучшенными экономическими показателями за счет изменения элементной базы.

В описываемых инверторах (рис.1–4) в качестве переключающих элементов использованы нелинейные индуктивности – насыщающиеся дроссели. На рис.1–3 представлены схемы мостовых инверторов, а на рис.4 – схема полумостового преобразователя напряжения.

Возможность получения незатухающих колебаний в этих инверторах основана на явлении насыщения ферромагнитного (металлического или ферритового) сердечника, когда к выводам дросселя, содержащего этот сердечник, прикладывается напряжение. Если сердечник дросселя не насыщен, его индуктивность равна

$$L_1 = \mu L_0,$$

а при насыщении сердечника

$$L_2 = L_0,$$

где μ – относительная магнитная проницаемость; L_0 – индуктивность дросселя без сердечника.

Ясно, что такой дроссель можно представить как некое устройство с двумя индуктивностями и внутренним переключателем, подключающим к выводам дросселя ту или иную индуктивность. Промежуток времени τ , в течение которого сердечник переходит из состояния с индукцией B_1 в состояние с индукцией B_2 , назовем интервалом ожидания. Из [3]

$$\tau = \Delta B S N / U,$$

где $\Delta B = B_2 - B_1$ – разность индукций, Вб/м²; S – сечение сердечника, м²; N – число витков катушки дросселя; U – приложенное к дросселю напряжение, В.

Рассмотрим вкратце электромагнитные процессы, происходящие в представленных инверторах.

В инверторе, изображенном на рис.1, тиристор $VS1$ соединен катодом с общей шиной, а анодом – через линейный дроссель $Dr1$ и насыщающийся дроссель $Dn1$ с шиной питания. Тиристор $VS2$ соединен анодом через линейный дроссель $Dr2$ с шиной питания, а катодом – через насыщающийся дроссель $Dn2$ – с общей шиной. Последовательная цепь, содержащая коммутирующий конденсатор C_k и нагрузку Z_h , одним свободным выводом подключена к общей точке соединения линейного $Dr1$ и нелинейного $Dn1$ дросселей, а другим выводом – к точке соединения тиристора $VS2$ и нелинейного дросселя $Dn2$. Эта цепь представляет собой диагональ переменного тока.

При замыкании коммутатора K конденсатор C_k заряжается до напряжения $U_c > E_n$ с полярностью, указанной на рис.1 без скобок. Здесь E_n – напряжение источника питания. Ток зарядки конденсатора проходит по цепи: "шина питания– $Dn1$ – C_k – Z_h – $Dn2$ –общая шина" и представляет собой импульс рабочего тока. В результате прохождения этого тока дроссели $Dn1$ и $Dn2$ намагничиваются в "прямом" направлении, т.е. намагничаются током, текущим по шине пи-

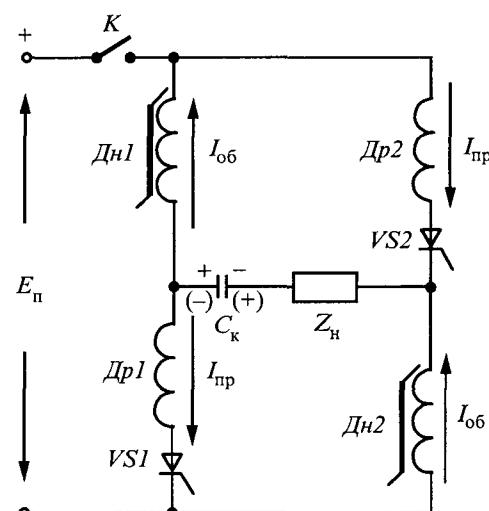


Рис.1. Инвертор напряжений. Вариант 1

тания к общей шине. Поскольку $U_c > E_n$, то после зарядки конденсатора в этой цепи пойдет ток в обратном направлении, сбрасывающий "излишки" заряда в конденсатор фильтра (на схеме не показан). Этот обратный ток перемагничивает сердечники $Dn1$ и $Dn2$ в обратном направлении.

При некотором значении обратного тока тиристоры $VS1$ и $VS2$ открываются. Сигналы, управляющие тиристорами, снимаются с трансформатора тока (не показан), включенного последовательно с нагрузкой, и подаются на схему управления тиристорами (не показана).

Ток, текущий по цепи "шина питания- $Dp2-VS2-Z_n-C_k-Dp1-VS1$ -общая шина", перезаряжает конденсатор C_k и меняет полярность напряжения на его обкладках (указана в скобках). По цепям: "шина питания- $Dn1-Dp1-VS1$ -общая шина", "шина питания- $Dp2-VS2-Dn2$ -общая шина" потекут сквозные токи, вследствие этого интервал ожидания должен быть больше половины периода колебания тока, т.е

$$\tau > T/2,$$

поэтому перезарядка конденсатора C_k заканчивается раньше, чем сердечники дросселей $Dn1$ и $Dn2$ насыщаются. После перезарядки конденсатора, напряжение на нем

$$U_c > E_n,$$

и по цепи: "общая шина- $VS1-Dp1-C_k-Z_n-VS2-Dp2$ -шина питания" пройдет короткий импульс тока, запирающий тиристоры. На этом первый период колебания тока заканчивается, и процесс зарядки конденсатора повторяется вновь.

На рис.2 представлен другой вариант мостового инвертора. Здесь тиристоры $VS1$ и $VS2$ со-

единены катодами с общей шиной, а анодами – с нелинейными дросселями $Dn1$ и $Dn2$, другие выводы которых соединены с шиной питания. Последовательная цепь, состоящая из коммутатора K , коммутирующего конденсатора C_k и нагрузки Z_n , включена в общие точки соединения анодов тиристоров и дросселей и представляет собой диагональ переменного тока. В этом инверторе конденсатор C_k должен быть предварительно заряжен. Это легко сделать, соединив свободный вывод конденсатора через резистор (не показан) с общей шиной. Полярность напряжения показана без скобок. При замыкании коммутатора K в цепи " $C_k-Z_n-Dn2-Dn1-C_k$ " пойдет ток. При этом токи, текущие через дроссели, окажутся противонаправленными – дроссель $Dn1$ намагничивается в прямом направлении, а $Dn2$ – в обратном направлении. При некотором значении тока откроется тот тиристор, анод которого подключен к выводу конденсатора с положительной полярностью напряжения, т.е. тиристор $VS2$. Управляющие сигналы снимаются с трансформатора тока (на схеме не показан), включенного в диагональ переменного тока, и подаются на схему управления тиристорами (также не показана). Открывшийся $VS2$ вызовет ток перезарядки конденсатора C_k в цепи "шина питания- $Dn1-C_k-Z_n-VS2$ -общая шина", перезаряжающий конденсатор и меняющий полярность на его обкладках (указана в скобках), а по цепи "шина питания- $Dn2-VS2$ -общая шина" пойдет сквозной ток, при этом его значение будет определяться индуктивностью ненасыщенного дросселя $Dn2$. Ток перезарядки конденсатора должен прекратиться раньше, чем сердечник дросселя $Dn2$ насытится, поэтому $\tau > T/2$. После перезарядки конденсатора напряжение на нем будет превосходить напряжение источника питания: $U_c > E_n$, и в цепи, по которой протекал ток перезарядки конденсатора, возникнет импульс обратного тока, закрывающий тиристор $VS2$. На этом половина периода заканчивается. Поскольку полярность на выводах конденсатора изменилась, изменится и направление тока, перемагничающего дроссели $Dn1$ и $Dn2$, поэтому следующим откроется тиристор $VS1$, и процесс перезарядки конденсатора C_k повторится, что в итоге приведет к завершению одного цикла работы схемы.

Схема еще одного варианта мостового инвертора представлена на рис.3. Здесь мост образуют четыре нелинейных дросселя $Dn1-Dn4$, а в диагональ переменного тока включена цепь, состоящая из коммутатора K , конденсатора C_k и

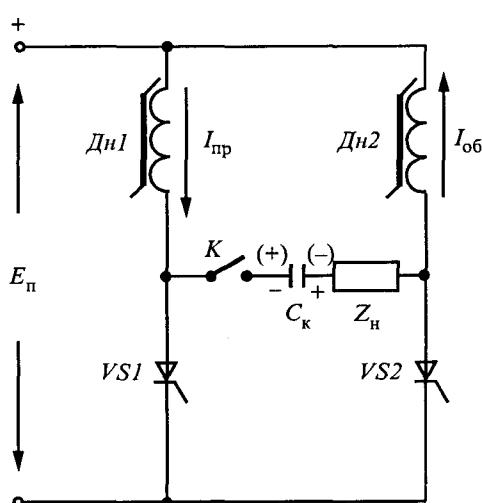


Рис.2. Инвертор напряжений. Вариант 2

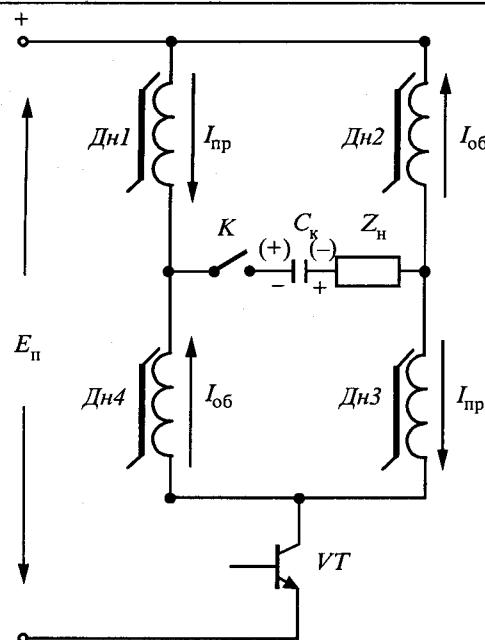


Рис.3. Инвертор напряжений. Вариант 3

нагрузки Z_h , причем конденсатор должен быть предварительно заряжен. Диагональ постоянного тока одним выводом соединена с шиной питания, а другим – посредством полупроводникового ключа VT с общей шиной. Если в качестве ключа использовать однооперационный тиристор, то необходим также блок принудительного запирания тиристора. Управляющие сигналы снимаются с трансформатора тока (не показан), включенного в диагональ переменного тока, и подаются на схему управления ключом (не показана).

В рассматриваемом инверторе имеются два внутренних контура: " $C_k-Z_h-\text{Дн2}-\text{Дн1}-C_k$ " и " $C_k-Z_h-\text{Дн3}-\text{Дн4}-C_k$ ". Индуктивности всех четырех дросселей одинаковы, а конденсатор C_k предварительно заряжен с полярностью, указанной без скобок. При замыкании коммутатора K по контурам потекут одинаковые токи, причем дроссели Дн2 и Дн4 намагничиваются в обратном направлении, а Дн1 и Дн3 – в прямом, т.е. дроссели Дн1 и Дн3 подготавливаются к прохождению по ним импульса рабочего тока. Некоторое значение этого подготовительного тока вызовет открывание тиристора, и по цепи "шина питания– Дн1 – C_k – Z_h – Дн3 – VT –общая шина" потечет импульс рабочего тока, перезаряжающий конденсатор C_k , а по цепям "шина питания– Дн1 – Дн4 – VT –общая шина" и "шина питания– Дн2 – Дн3 – VT –общая шина" потекут нарастающие сквозные токи, в связи с чем интервал ожидания $\tau > T/2$. Тогда импульс рабочего тока закончится раньше, чем сердечники дросселей Дн2

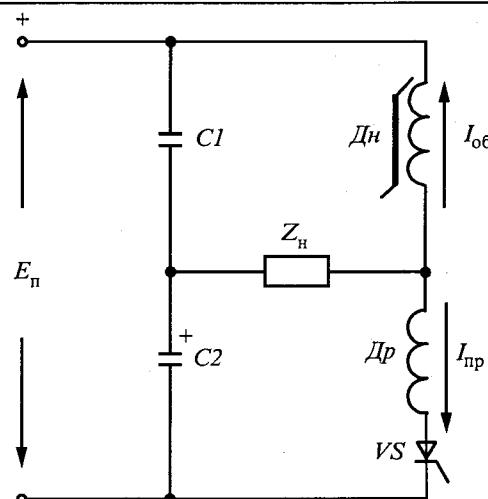


Рис.4. Полумостовой инвертор напряжений

и Дн4 насыщаются. По окончании зарядки конденсатора транзистор VT закроется, на конденсаторе будет другая полярность (показана в скобках), и по внутренним контурам снова потекут токи, однако уже в другом направлении. Произойдет перемагничивание дросселей, откроется транзистор VT , и по цепи "шина питания– Дн2 – Z_h – C_k – Дн4 – VT –общая шина" пройдет импульс рабочего тока, перезаряжающего конденсатор, а по указанным параллельным цепям потекут сквозные токи. Перезарядка конденсатора заканчивается раньше, чем сердечники дросселей Дн1 и Дн3 насыщаются. Транзистор закроется, что означает конец одного периода колебания тока.

Схема полумостового инвертора представлена на рис.4. Устройство содержит нелинейный дроссель Дн , линейный дроссель Др , тиристор VS , два конденсатора C_1 и C_2 . Нагрузка Z_h включена одним выводом в общую точку соединения конденсаторов, а другим – в общую точку соединения дросселей, причем нелинейный дроссель Дн соединен с шиной питания, а линейный дроссель Др через тиристор соединен с общей шиной. Индуктивность линейного дросселя равна индуктивности насыщенного нелинейного дросселя. Это равенство необходимо для выравнивания амплитуд и частот токов двух колебательных контуров " $C_1-Z_h-\text{Дн}-C_1$ " и " $C_2-Z_h-\text{Др}-VS-C_2$ ". Первоначально конденсатор C_1 не заряжен, а конденсатор C_2 заряжен с положительной полярностью напряжения в общей точке соединения конденсаторов. При открывании тиристора VS по цепи " $C_2-Z_h-\text{Др}-VS-C_2$ " потечет ток, перезаряжающий конденсатор C_2 , а по цепи "шина питания– $C_1-Z_h-\text{Др}-VS$ –общая шина" потечет ток зарядки конденсатора C_1 , и,

наконец, по цепи "шина питания-Дн-Др-VS-общая шина" – сквозной ток. Как и ранее, $\tau > T/2$, поэтому процесс зарядки-перезарядки конденсаторов закончится раньше, чем сердечник дросселя $Дн$ насытится. В общей точке соединения конденсаторов и нагрузки полярность напряжения теперь отрицательна, и по цепи "C2-VS-Др- Z_h -C2" пройдет короткий импульс тока, запирающий тиристор. На этом половина периода заканчивается.

Вторая половина периода начинается с перезарядки конденсатора $C1$ по цепи "C1-Дн- Z_h -C1" и зарядки конденсатора $C2$ по цепи "шина питания-Дн- Z_h -C2-общая шина". При этом в нагрузке Z_h токи суммируются. После окончания процесса зарядки-перезарядки конденсаторов в общей точке соединения конденсаторов и нагрузки полярность напряжения снова положительна, при этом напряжение превосходит напряжение источника питания. Конденсатор $C1$ начнет разряжаться по цепи "C1- Z_h -Дн-C1", а конденсатор $C2$ сбрасывать "излишки" заряда по цепи "общая шина-C2- Z_h -Дн-шина питания". Оба тока – обратные, они перемагничивают сердечник дросселя $Дн$ в обратном направлении". При некотором значении этих токов вновь откроется тиристор VS , и процесс зарядки конденсатора $C1$ и, соответственно, перезарядки конденсатора $C2$ повторится.

Управляющие сигналы снимают с трансформатора тока (не показан), включенного последовательно с нагрузкой, и подают на схему управления тиристором (не показана). В схемах управления присутствуют одиночные или спаренные переменные резисторы, на которые непосредственно подают сигналы с трансформаторов тока. Этими резисторами задают значение обратного тока, при котором происходит включение полупроводниковых приборов. Необходимое значение указанного тока находится опытным путем.

Приведем оценочный расчет рабочего тока, иллюстрирующие возможности представленных схем. Использованы следующие формулы и значения параметров электрических цепей.

$$\tau = \Delta B S N / E_{\text{п}}, \quad (1)$$

$$L_0 = \mu_0 S N^2 / l; \quad (2)$$

$$L = L_0 + L_h; \quad (3)$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC_k}; \quad (4)$$

$$\rho = \sqrt{L/C_k}; \quad (5)$$

$$I = (E_{\text{п}} + U_c) / \rho, \quad (6)$$

где τ – интервал ожидания; $\Delta B = (B_1 - B_2)$ размах индукции; S – сечение сердечника; N – число витков катушки; $E_{\text{п}}$ – напряжение питания; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн·м – магнитная проницаемость вакуума; l – длина катушки; L – индуктивность цепи; L_0 – индуктивность насыщенного дросселя; L_h – индуктивность нагрузки; T – период; C_k – емкость конденсатора; ρ – волновое сопротивление; I – амплитуда тока; U_c – амплитуда напряжения на конденсаторе.

Если задать численные значения:

$E_{\text{п}} = 300$ В; $S = 10^{-3}$ м²; $l = 0,1$ м; $L_h = 10^{-4}$ Гн; $T = 10^{-4}$ с; $U_c = 10^3$ В; $\Delta B = 1$ Вб/м²; $\tau = 6 \cdot 10^{-5}$ с, при условии, что омическое сопротивление цепи пренебрежимо мало, то, последовательно применяя приведенные выше формулы, получим амплитуду тока $I = 197$ А.

Для того, чтобы получить не столь большое значение амплитуды рабочего тока, следует использовать увеличенный интервал ожидания и проделать новый расчет по формулам (1)–(6).

Выводы

1. Описанные схемы инверторов были использованы при монтаже действующих макетов. Испытания подтвердили работоспособность устройств при разных входных напряжениях, различных нагрузках. Были измерены входные токи, напряжения на тиристорах, определен угол управления тиристорами.

2. Разработанные схемы инверторов, содержащие вдвое меньшее количество тиристоров (по сравнению с известными полностью тиристорными устройствами), по эксплуатационным характеристикам не уступают описанным ранее [1]. Особенности предложенных схемных решений открывают возможности для широтно-импульсного регулирования напряжения.

Список литературы

1. Справочник по преобразовательной технике. Киев: Техника, 1978.
2. Пат. 2038684 РФ. Автономный инвертор/ Э.А. Дизендорф // Открытия. Изобретения. 1996. № 18.
3. Пат. 2038685 РФ. Инвертор / Э.А.Дизендорф // Открытия. Изобретения. 1996. № 18.
4. Пат. 2038686 РФ. Инвертор напряжения/ Э.А. Дизендорф // Открытия. Изобретения. 1996. № 18.
5. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. М.: Высшая школа. 1964. С. 249.

Дизендорф Эдуард Анатольевич – инженер Института ядерной физики Сибирского отделения РАН. Окончил физический факультет Новосибирского государственного университета в 1967 г.

В академии электротехнических наук РФ

Академия электротехнических наук РФ является преемницей созданного в конце XIX века сообщества российских электротехников и продолжательницей славных традиций отечественной электротехники, основы которой были заложены великим русским ученым М.В. Ломоносовым.

Учредительная конференция ученых и специалистов, в области электротехники, на которой была учреждена АЭН РФ состоялась 25 февраля 1993 г. в Суздале.

Учредительная конференция была проведена по инициативе Г.Е. Иванченко, Б.И. Петленко, В.А. Альтова, А.В. Нетушила и др. Под председательством одного из инициаторов создания АЭН РФ Б.И. Петленко был утвержден устав академии и президиум в количестве 13 человек. Президентом академии был избран В.Г. Герасимов – заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат Государственной премии, доктор техн. наук, профессор; первым вице-президентом – Б.И. Петленко – заслуженный деятель науки РФ, доктор техн. наук, профессор; вице-президентами – В.А. Альтов – заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии, доктор техн. наук, профессор; Ю.Н. Вершинин – чл.кор. РАН, лауреат Государственной премии, вице-президент Уральского отделения РАН; главным ученым секретарем Г.Е. Иванченко – доктор техн. наук, профессор.

На учредительной конференции были также утверждены составы Совета Учредителей (председатель В.А. Альтов), в который вошли инициаторы создания академии, и ревизионной комиссии (председатель В.А. Филиков).

16 июня 1993 г. Министерство юстиции Российской Федерации зарегистрировало АЭН РФ как высшую в своей области научно-техническую организацию с общероссийским статусом, имеющую в своем составе около 50 региональных отделений.

На юбилейном собрании, посвященном 10-летию АЭН, присутствовали члены АЭН РФ, РАН, представители предприятий и организаций – членов АЭН РФ, представители правительственные ведомств и организаций РФ, мэрии Москвы и приглашенные гости.

С вступительным словом к участникам собрания обратился академик РАН и АЭН РФ К.С. Демирчян. Он отметил, что созданная по инициативе ведущих советских ученых-электро-

техников и энергетиков, руководителей крупных научно-технических центров и организаций, академия электротехнических наук РФ за десять лет своей деятельности превратилась в авторитетный научно-технический центр, который объединяет в своих рядах около 600 крупнейших российских ученых и специалистов в области электротехники, электроэнергетики, электроники, информационной и вычислительной техники. В составе академии – более 30 членов РАН, свыше 50 заслуженных деятелей науки, более 450 докторов и профессоров, около 100 лауреатов Ленинской и Государственных премий.

С докладом о деятельности АЭН РФ выступил президент академии профессор Б.И. Петленко. Он отметил, что созданные в академии научно-отраслевые и региональные отделения, научно-промышленный, научно-редакционный и экспертные советы активно работают, объединяя усилия членов академии над решением актуальных проблем развития отечественной науки. Члены АЭН РФ через научно-отраслевые и региональные отделения принимали участие в формировании и реализации государственных, отраслевых и региональных научно-технических программ, осуществляли независимую экспертизу отдельных проектов, в том числе, и конкурсных для правительственные организаций России и регионов.

Для обеспечения влияния АЭН РФ на формирование и реализацию научно-технической политики России академией проводилась следующая работа:

- участие в формировании общественного мнения и позиции руководства России по актуальным проблемам электроэнергетики, электротехнической промышленности и науки; направление соответствующих обращений к Президенту и премьер-министру РФ, в Совет Федерации, Госдуму, Совет Безопасности; публикация соответствующих аналитических обзоров в печати, участие в работе Российского союза общественных академий наук (РОСАН), взаимодействие с комитетами Госдумы;

- инициирование, разработка и реализация федеральных, региональных и отраслевых научно-технических программ; среди них можно отметить:

- программы в области электроэнергетики РАО "ЕЭС России"; Миннауки РФ, АО "Мосэнерго" и др.;

- федеральную целевую программу "Энергосбережение России" (1998–2005 гг.), включающую подпрограмму "Производство сертифицированных приборов систем учета и регулирования расхода энергоресурсов и оснащение ими потребителей", решением Минтопа РФ организациям АЭН поручена координация всех работ по этой программе;
- федеральную программу "Развитие автомобильной электротехники и электроники России до 2005 г." и др.;
- участие в проведении независимых экспертиз научно-технических программ и проектов, в том числе по заданию Экспертного совета при Правительстве РФ, среди них:
 - стратегия развития энергетики России на период до 2020 г., разработанная большим числом организаций в течение 5 лет во исполнение распоряжения Правительства РФ;
 - целевые программы "Возрождение Российского флота", 1995 г.; "Российские верфи" (подпрограмма "Приборостроение"), 1996–2001 гг.; "Мировой океан" (подпрограмма "Создание технологий для освоения ресурсов и пространств Мирового океана"), 1999–2002 гг.;
 - международная программа по созданию экспериментального термоядерного реактора ИТЭР;
 - государственная программа "Энергосберегающие технологии";
 - проект закона РФ "Об обеспечении электромагнитной совместимости сред и объектов" и др.;
 - проведение конференций и выставок (академией ежегодно проводятся около 20 международных, национальных и региональных конференций и выставок);
 - совместно с Госстандартом России академией разработан ряд ГОСТов и других нормативных документов, регламентирующих требования к различному электротехническому оборудованию, в частности:
 - нормативная документация по использованию электрической энергии во взрывоопасных средах (газе и пыли) для предприятий угольной промышленности;
 - отраслевые нормативные документы на изготовление и применение агрегатов с поршневыми и газотурбинными приводами, работающие на природном газе, для электростанций малой мощности;
 - нормативные документы, регламентирующие электромагнитную совместимость на судах;
 - предложения по освещению г. Москвы.

Направлены в Госстандарт РФ предложения об унификации бортовых систем обмена информацией (научно-отраслевое отделение "Электроника и вычислительная техника"); о необходимости сертификации агрегатов бесперебойного питания (научно-отраслевое отделение "Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности"); о решении актуальных проблем электромагнитной совместимости (научно-отраслевое отделение "Высоковольтная электротехническая и электронная аппаратура. Электромагнитные излучения, совместимость и экология"); об организации технического комитета России в МЭК по магнитным материалам (научно-отраслевое отделение "Средства и системы управления, контроля и автоматизации"); о необходимости разработки и утверждения новых ГОСТов по пожаростойкости кабельных изделий (научно-отраслевое отделение "Электротехнические материалы и изделия") и др.

– постоянная активная издательская деятельность, направленная на оперативное информирование научно-технической общественности России о новейших технических достижениях и разработках.

Коллективным достижением членов АЭН РФ является издание книги "История электротехники" под общей редакцией академика РАН и АЭН РФ И.А. Глебова. В настоящее время ведется интенсивная работа по подготовке четырехтомной "Электротехнической энциклопедии", завершить работу над которой предполагается в 2005 г. Выпущен англо-русский словарь терминов "Силовая электроника" и др.

В докладе была особо подчеркнута роль региональных отделений, работа каждого из которых определяется спецификой развития науки, промышленности и энергетики в данном регионе. Отмечено, что наиболее активно работают: Дальневосточное, Красноярское, Орловское, Омское, Оренбургское, Владимирское, Балтийское, Санкт-Петербургское, Тюменское и некоторые другие региональные отделения. В тоже время работа ряда региональных отделений требует определенной активизации.

Направления деятельности научно-отраслевых отделений определяются их спецификой, которая в значительной степени отражена в работе проблемных советов отделений. В настоящее время в академии работают 47 проблемных советов, активно участвующих в формировании тематики, организации и проведении научно-технических конференций, выставок, семинаров и круглых столов по направлениям деятельности

ти научно-отраслевых отделений академии. За 10 лет было проведено более 200 международных, российских и региональных научно-технических конференций, выставок и семинаров.

За годы существования академии члены АЭН РФ подготовили несколько сот монографий, опубликовали тысячи научных статей, получили сотни патентов и авторских свидетельств на изобретения.

В работе академии принимают участие в качестве коллективных членов более 200 организаций, разделяющих цели и задачи академии и имеющих в ней своих представителей.

Кроме развития многосторонних связей с РАН как ведущим научным учреждением страны АЭН РФ придает большое значение укреплению партнерских отношений и взаимодействию с другими общественными академиями

наук (ОАН), составляющими общественный сектор науки России. Эти взаимодействия носят двусторонний и многосторонний характер. В числе последних – согласованная позиция во взаимоотношениях с законодательными и исполнительными структурами России, а также в рамках созданного в феврале 2002 г. Российского союза общественных академий наук (РОСАН).

Основными целями деятельности РОСАН являются – объединение усилий общественных академий наук в интересах развития научно-технического социально-экономического прогресса, приумножения культурного наследия, консолидации интеллектуальных сил Российской Федерации.

*Б.И. Петленко, президент АЭН РФ
Ю.М. Иньков, главный ученый АЭН РФ*

АКАДЕМИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (АЭН РФ)

извещает о планируемом в декабре 2003 г. общем собрании членов АЭН РФ и открывающихся вакансиях действительных членов и членов-корреспондентов Академии по следующим научно-отраслевым отделениям:

		Число вакансий
	действительных членов	членов-корреспондентов
1. Теоретическая электротехника	1	1
2. Электроэнергетика	1	2
3. Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности	1	2
4. Электротехнические системы и устройства общего и специального назначения (в строительстве, горном деле, сельском хозяйстве и социальной сфере)	2	1
5. Электротехнические системы транспорта и космической техники	2	2
6. Электротехнология	1	1
7. Средства и системы контроля, управления и автоматизации	1	1
8. Электротехнические материалы и изделия	1	2
9. Электрофизические и сверхпроводящие устройства	1	1
10. Высоковольтная электротехническая и электронная аппаратура. Электромагнитные излучения, совместимость и экология	2	1
11. Электроника и вычислительная техника	1	1
12. Телекоммуникационные и информационные сети и системы	1	1
13. Стандартизация и сертификация в электротехнике	1	1
14. Электротехника и электроника в медицине	1	1
15. Высшее электротехническое образование	1	1

Действительными членами Академии электротехнических наук РФ согласно уставу академии избираются ученые, обогатившие науку выдающимися достижениями и открытиями, широко признанными и используемыми в научно-практической деятельности.

Членами-корреспондентами академии электротехнических наук РФ согласно уставу академии избираются ученые и специалисты, внесшие признанный вклад в развитие электротехнической науки.

Выдвигать кандидатов в действительные члены и члены корреспонденты могут научные учреждения, высшие учебные заведения, государственные, общественные и другие организации, а также действительные члены и члены-корреспонденты АЭН РФ по указанным в данной публикации научно-отраслевым отделениям.

В случае представления кандидатов научными учреждениями, высшими учебными заведениями, государственными, общественными и другими организациями выдвижение производится на заседаниях ученых и научно-технических советов, коллегий или президиумов путем голосования простым большинством голосов.

Представление на кандидатов в действительные члены и члены-корреспонденты АЭН РФ с соответствующей мотивировкой и приложением необходимых документов направляется в ад-

рес президиума академии в течение месяца со дня настоящей публикации.

Необходимо представить в 2-х экземплярах следующие документы: 1) заявление об участие в конкурсе; 2) письмо-представление организации с выпиской из решения НТС (УС) государственных, общественных и других организаций с результатами голосования, подписанной председателем и ученым секретарем НТС (УС), заверенной печатью; или представление на соискателя от членов Академии электротехнических наук РФ с соответствующей мотивировкой; 3) личный листок по учету кадров; 4) автобиографию; 5) заверенный список научных трудов; 6) копии дипломов: об окончании вуза, доктора наук; аттестат профессора; 7) отзыв о научно-производственной и общественной деятельности кандидата с основного места работы; 8) личную научную программу (объемом не более двух страниц); 9) три фотографии размером 3×4.

Материалы направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14, Президиум Академии электротехнических наук РФ.

**Б.И.Петленко, президент Академии
электротехнических наук РФ**
**Ю.М.Иньков, главный ученый секретарь
Академии электротехнических наук РФ**

Журнал “Электротехника” переводится в США фирмой “ALLERTON PRESS, INC”.

Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар в валюте авторам опубликованных в нашем журнале статей.

**Справки по телефону: 203-35-33, 203-59-53
Адрес: 103670, Москва, ул. Б.Бронная, 6а, комн. 110.**

Необходимо знать название статьи, год и номер журнала, страницы.

Ежемесячный научно-технический журнал.

Издаётся с января 1930 г.

Научно-технический журнал "Электротехника" более 70 лет активно способствует развитию электротехнической промышленности.

Публикуя теоретические статьи, освещающие существующие проблемы, и статьи по результатам исследований новых типов электротехнического оборудования журнал дает возможность специалистам, занятым созданием и применением низковольтной аппаратуры, силовых полупроводниковых приборов, преобразовательных устройств, трансформаторов, высоковольтной техники, электрических машин, электроприводов и систем управления использовать новейшие достижения в своих разработках.

Публикуемая на страницах журнала реклама продукции, выпуск специальных номеров журнала по тематике и материалам (в том числе рекламным) заказчика, помогут Вам найти надежных партнеров как у нас в стране, так и за рубежом.

Журнал является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ. Журнал "Электротехника" входит в "Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов докторских и кандидатских диссертаций на соискание ученой степени доктора наук".

Журнал "Электротехника" распространяется по подписке в странах СНГ, ближнем и дальнем зарубежье – через АРЗИ (г. Москва) по объединенному каталогу Департамента почтовой связи Министерства связи Российской Федерации. Подписной индекс – 71111.

"Электротехника" переводится на английский язык и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" в полном объеме.

**Приглашаем Вас к активному сотрудничеству.
Будем рады видеть Вас среди авторов, подписчиков и
рекламодателей нашего журнала.**

Редакция журнала "Электротехника":

123242, Москва, Зоологическая ул., д.11, комн. 213.

Факс/телефон: 254-11-52, E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru