

ВЕСТНИК

**ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА** № 26 (126)
2008

ISSN 1990-8512

СЕРИЯ

«ЭНЕРГЕТИКА»

Выпуск 10

*ПОСВЯЩАЕТСЯ
65- ЛЕТИЮ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА*

Учредитель – ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет».

Редакционная коллегия серии:

д.т.н., профессор, член-корреспондент
АЭН РФ **Ю.И. Хохлов** (*отв. редактор*);
к.т.н., доцент **Б.Г. Булатов**
(*зам. отв. редактора*);
к.т.н., доцент **Л.Т. Волков**;
Д.В. Коробатов (*отв. секретарь*);
д.т.н., профессор, заслуженный деятель
науки и техники РФ **Е.В. Торопов**;
д.т.н., профессор **Л.И. Цытович**;
д.т.н., профессор **Ш.Н. Хусаинов**.

Серия основана в 2001 году.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-26455 выдано 13 декабря 2006 г. Федеральной службой по надзору законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Подписной индекс 29564 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 2 номера в год

СОДЕРЖАНИЕ

Теплоэнергетика

ДЕНИСЕНКО Ю.Н., ПАНФЁРОВ В.И. Решение задачи структурной идентификации математической модели отопительной установки 4

СЕМЕНОВ В.П., ПЛАТОНОВ Н.И. Исследование теплообмена в контактном аппарате с пленочными форсунками 10

Электроэнергетика

КОРЖОВ А.В., ЮРЧЕНКО Е.Ю. Определение влияния грунтово-климатических параметров на изоляцию силового кабеля на основании статистических данных 15

КРЕКЕР Е.Я., АНДРЕЕВ А.Н. Способ и устройство гашения поля синхронного генератора 21

КАРАНДАЕВ А.С., ЕВДОКИМОВ С.А., КАРАНДАЕВА О.И., МОСТОВОЙ С.Е., ЧЕРТОУСОВ А.А. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования 26

КИРПИЧНИКОВА И.М., СОЛОМИН Е.В. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения 32

ГОЛЬДШТЕЙН М.Е., ГОРШКОВ К.Е. Исследование работы системы самовозбуждения синхронного генератора при внешних несимметричных коротких замыканиях 36

Преобразовательная техника

САПРУНОВА Н.М., КОРНИЕНКОВА Е.В. Переходные характеристики цепи управления транзистора IGBT 42

Электромеханика

КЛИНАЧЕВ Н.В., КЛИНАЧЕВА Н.В. Представление математических моделей электрических машин с помощью графического языка программы Jigrein 46

СТРИГОВ А.Д., САРВАРОВ А.С. Моделирование пуско-тормозных режимов электропривода машины центробежного литья валков 50

ОСИПОВ О.И., МЕЛЬНИКОВ В.В., ОСЬКИН А.А., КУЦЫЙ К.Л. Управление тиристорными возбудителями высоковольтных синхронных двигателей 56

CONTENTS

Heat-power engineering

DENISENKO Y.N., PANFEROV V.I. The decision of the task of structural identification of mathematical model of heating installation	4
SEMENOV V.P., PLATONOV N.I. The analysis of heat transform in a contact film jet apparatus	10

Electric power engineering

KORZHOV A.V., YURCHENKO E.Y. The determination of the influence soil and climatic parameter on insulation of power cable line on base of analysis statistical data	15
KREKER E.J., ANDREEV A.N. Way and device of synchronous generator field suppression	21
KARANDAEV A.S., EVDOKIMOV S.A., KARANDAEVA O.I., MOSTOVOY S.E., CHERTOUSOV A.A. Monitoring of technical condition of power transformers with the method of acoustical diagnosing	26
KIRPICHNIKOVA I.M., SOLOMIN E.V. Vertical Axis Wind Turbine	32
GOLDSTEIN M.E., GORSHKOV K.E. Analysis of synchronous generator excitation system operation at various kinds of non-symmetrical external short circuits	36

Converting technics

SAPRUNOVA N.M., KORNIENKOVA E.V. Transitive characteristics of an IGBT transistor control circuit	42
---	----

Electromechanics

KLINACHEV N.V., KLINACHEVA N.V. Presentation of mathematical models of electrical machines by means of Jigrein graphical language	46
STRIGOV A.D., SARVAROV A.S. Simulation of start-up and braking conditions of the electric drive of the machine of centrifugal casting of rollers	50
OSIPOV O.I., MELNIKOV V.V., OSKIN A.A., KUTSII C.L. Control of thyristor activators of high-voltage synchronous motors	56

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 697.34

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТОПИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Ю.Н. Денисенко, В.И. Панферов
г. Челябинск, ЮУрГУ

THE DECISION OF THE TASK OF STRUCTURAL IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL OF HEATING INSTALLATION

Y.N. Denisenko, V.I. Panferov
Chelyabinsk, SUSU

Рассматриваются варианты структуры математической модели отопительного прибора. Оценено качественное и количественное различие моделей. Отмечены специфические особенности моделей, позволяющие улучшить управление процессами системы теплоснабжения.

Ключевые слова: модель отопительной установки, структурный синтез моделей, качественно-количественное регулирование, график регулирования.

Variants of structure of mathematical model of the heating device are considered. Qualitative and quantitative distinction of models is appreciated. Specific features of the models allowing improvement of the management of processes of system of heat supply are marked.

Keywords: model of heating installation, structural synthesis of models, qualitative - quantitative regulation, schedule of regulation.

Вопросы создания математической модели отопительного прибора рассматривались в работах многих авторов. Так, в зависимости от способа определения его мощности (теплового потока) выделяют ряд функциональных зависимостей, составляющие параметры которых могут быть известны явным образом или определены с учетом некоторых допущений [1].

По-видимому, исторически первой математической моделью отопительного прибора является широко известное уравнение для определения его мощности:

$$Q_o = K(0,5(t_{ax} + t_{вых}) - t_g)F, \quad (1)$$

где K и F – коэффициент теплопередачи и площадь поверхности отопительного прибора; t_{ax} и $t_{вых}$ – температура теплоносителя на входе в прибор и выходе из него; t_g – температура воздуха в помещении.

Уравнение содержит как входные переменные t_{ax} и t_g , так и выходную переменную $t_{вых}$.

Следует отметить интересную особенность: в литературе по расчету систем отопления неявным образом считается, что зависимость температуры теплоносителя от F является линейной функцией. На это указывает то, что среднее значение темпе-

ратурного напора для отопительного прибора принято вычислять по формуле:

$$\Delta \bar{t} = \frac{t_{ax} + t_{вых}}{2} - t_g. \quad (2)$$

Формула (2) будет давать точное значение среднего температурного напора только в том случае, если температура теплоносителя вдоль F будет распределяться по прямой и будет при этом знакопостоянной функцией. В самом деле хорошо известно, что средняя температура теплоносителя определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \frac{1}{F} \int_0^F t(F) dF = \frac{1}{F} S_{TP} = \frac{1}{F} \times \frac{t(0) + t(F)}{2} \times F = \\ &= 0,5(t_{ax} + t_{вых}), \end{aligned} \quad (3)$$

где S_{TP} – площадь прямолинейной трапеции, образованной линейной знакопостоянной зависимостью $t(F)$ и осью абсцисс на отрезке $[0; F]$, что подтверждает справедливость вышеприведенного замечания по поводу вычисления $\Delta \bar{t}$ по формуле (2).

При расчете любого теплообменного аппарата неизвестные составляющие могут быть определены из уравнений теплопередачи или теплового

баланса. Не является исключением и отопительный прибор, для которого:

$$Q_o = cG(t_{ex} - t_{вых}), \quad (4)$$

где c и G – теплоёмкость и массовый расход теплоносителя.

Таким образом, решая уравнения (1) и (4), найдем *первый вариант структуры статической модели* отопительного прибора, описываемый следующими уравнениями:

$$\begin{cases} Q_{o1} = \frac{cG(t_{ex} - t_e)}{0,5 + \frac{cG}{KF}}, \\ t_{вых} = t_{ex} - \frac{Q_o}{cG} \end{cases}, \quad (5)$$

для которой на рис. 1 приведена структурная схема отопительного прибора.

На рис. 1 t_{ex} , t_e и G – входные переменные; при этом t_{ex} и G являются управляющими воздействиями, соответственно t_e следует отнести к категории возмущений.

Для отыскания другого варианта структуры математической модели выделим бесконечно малый участок площади поверхности отопительного прибора и запишем уравнение теплового баланса для этого участка [2]:

$$-Gcdt = K(t - t_e)dF, \quad (6)$$

где t – температура теплоносителя в пределах участка dF .

Если считать коэффициент теплопередачи постоянным, то уравнение (6) будет представлять собой уравнение с разделяющимися переменными, которое можно представить в виде:

$$\frac{dt}{t - t_e} = -\frac{K}{Gc} dF. \quad (7)$$

Решая (7) с учетом того, что $t(0) = t_{ex}$, получим:

$$t(F) = t_e + (t_{ex} - t_e) \cdot \exp\left(-\frac{KF}{Gc}\right). \quad (8)$$

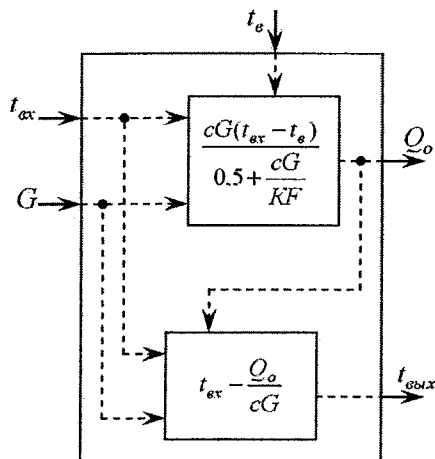


Рис. 1. Структурная схема статической модели отопительного прибора для системы уравнений (5)

Уравнение (8) описывает изменение температуры теплоносителя вдоль поверхности теплообмена при постоянном коэффициенте теплопередачи и если F вся поверхность теплообмена, то $t(F) = t_{вых}$.

Используя уравнение (8), нетрудно найти выражение для мощности отопительного прибора, очевидно, что это величину следует определять по уравнению:

$$Q_o = \left(1 - e^{-\frac{KF}{cG}}\right) cG(t_{ex} - t_e).$$

Таким образом, *второй вариант структуры статической модели* отопительного прибора представляется следующими уравнениями:

$$\begin{cases} Q_{o2} = \left(1 - e^{-\frac{KF}{cG}}\right) cG(t_{ex} - t_e); \\ t_{вых} = t_e + (t_{ex} - t_e) \cdot \exp\left(-\frac{KF}{Gc}\right). \end{cases} \quad (9)$$

Структурная схема модели отопительного прибора в этом случае представлена на рис. 2.

С другой, стороны из теории рекуперативных теплообменных аппаратов (ТО), работающих, например, по схеме «противоток», известно, что мощность теплообменника следует вычислять по формуле

$$Q_{mo} = \varepsilon \cdot cG_1(t_{1ex} - t_{2ex}),$$

где t_{1ex} и t_{2ex} – температуры первичного и вторичного теплоносителя на входе в теплообменник; cG_1 – эквивалент расхода первичного теплоносителя; ε – коэффициента эффективности ТО, определяемый по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-\frac{KF}{cG_1} \left[\frac{cG_1}{cG_2} - 1 \right]}}{1 - \frac{cG_1}{cG_2} e^{-\frac{KF}{cG_1} \left[\frac{cG_1}{cG_2} - 1 \right]}}, \quad (10)$$

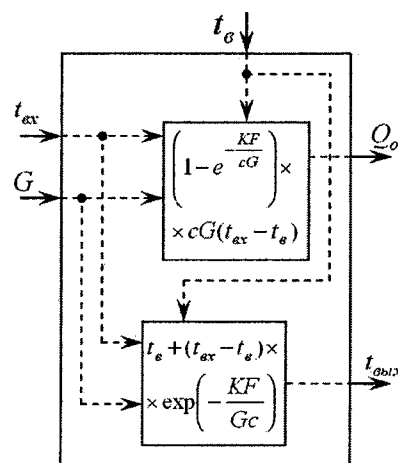


Рис. 2. Структурная схема статической модели отопительного прибора для системы уравнений (9)

где cG_2 – эквивалент расхода вторичного теплоносителя.

Применительно к отопительному прибору следует считать, что cG_1 – эквивалент расхода воды, протекающий через прибор (cG), а cG_2 – эквивалент расхода воздуха, омывающего отопительный прибор, который во много раз больше cG_1 . Учитывая это, получим выражение для коэффициента эффективности ОУ:

$$\varepsilon_o = 1 - e^{-\frac{KF}{cG}}. \quad (11)$$

Параметр ε_o позволяет определять мощность ОУ через большую разность температур теплообменивающихся сред:

$$Q_o = \varepsilon_o \cdot cG(t_{ax} - t_g), \quad (12)$$

откуда совместное решение с уравнением (11), позволяет получить зависимость, полностью совпадающую с уравнением статика (9):

$$Q_{o2} = \left(1 - e^{-\frac{KF}{cG}}\right) cG(t_{ax} - t_g).$$

Уравнение (9) удобно использовать для расчета конкретного отопительного прибора. Если же рассматривать в целом всю систему отопления, то удобно перейти к параметрам теплоносителя в тепловой сети, так как температурный график в наружных сетях обычно выше, чем установленный для отопительной установки (ОУ). Поэтому структуру модели (9) на рис. 2 можно дополнить схемой узла смешения (рис. 3).

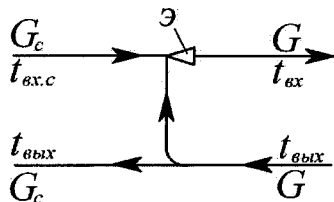


Рис. 3. Схема узла смешения перед системой отопления

На рис. 3 смесительным устройством является водоструйный элеватор (Э), перед которым «средствами автоматики» [3] установлен расход сетевой воды G_c с температурой $t_{ex.c} > t_{ex}$. Физический смысл перехода с температурного режима наружных сетей на температурный график системы отопления определяется через уравнение неразрывности струи посредством вычисления коэффициента смешения:

$$u = \frac{t_{ex.c} - t_{ex}}{t_{ex} - t_{вых}} = \frac{G - G_c}{G_c}. \quad (13)$$

Выразим температуру воды на входе в ОУ t_{ex} через коэффициент смешения с учетом (5):

$$t_{ex} = t_{ex.c} - u \frac{Q_o}{cG},$$

подставив которую в (5) для Q_{o1} , получим следующую модификацию уравнения статика, позволяющую находить мощность отопительного прибора через разность температур теплообменивающихся сред:

$$Q_o = \varepsilon_o \cdot cG(t_{ex.c} - t_g), \quad (14)$$

откуда коэффициент эффективности равен

$$\varepsilon_o = \frac{1}{0,5 + u + \frac{cG}{KF}}. \quad (15)$$

При совпадении установленных температурных графиков в системе отопления и тепловых сетях необходимость устройства узла смешения отпадает, то есть $u = 0$, тогда коэффициент эффективности примет вид:

$$\varepsilon_o = \frac{1}{0,5 + \frac{cG}{KF}}, \quad (16)$$

откуда ясно, что при подстановке (16) в (12) также перейдем к виду структуры статической модели (5).

Из рис. 3 и уравнения (13) следует, что $G = (1 + u)G_c$. С учетом этого мощность ОУ можно представить следующим выражением:

$$Q_o = \varepsilon_o \cdot cG_c(t_{ex.c} - t_g), \quad (17)$$

где коэффициент эффективности соответственно равен:

$$\varepsilon_o = \frac{1}{0,5 + u + \frac{cG_c}{KF} \cdot \frac{1}{1 + u}}. \quad (19)$$

Таким образом, для систем отопления, подключенных по зависимой схеме с температурным графиком ниже, чем в тепловой сети, удобно использовать уравнение (17) для определения мощности системы отопления в целом, где достаточно знать только установленные входные параметры и значение коэффициента смешения.

Для получения третьего варианта структуры статической модели отопительного прибора учтем зависимость коэффициента теплопередачи от среднего значения температурного напора и расхода. Как известно [4] эта зависимость имеет вид:

$$K = m \Delta t^n \bar{G}^p, \quad (20)$$

где m , n и p – экспериментальные числовые показатели, зависящие от типа прибора и характера циркуляции в нем воды; Δt – текущий температурный напор; \bar{G} – относительный расход воды.

Подставив соотношение (20) в уравнение (6), а затем проинтегрировав, найдем выражение для вычисления текущего температурного напора отопительного прибора:

$$\Delta t = t - t_g = \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}}.$$

Откуда зависимость температуры теплоносителя от площади поверхности F , очевидно, будет представляться следующим уравнением:

$$t(F) = t_g + \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (21)$$

позволяющим определить $t_{вых}$ при конкретном значении F .

В работе [2] построены кривые распределения температуры теплоносителя вдоль площади поверхности отопительного прибора для различных значений расхода, из которых видно, что формулы (8) и (21) дают практически одинаковое распределение температуры теплоносителя вдоль поверхности теплообмена. Различие становится существенным только при больших значениях F и малых значениях расхода теплоносителя.

Формулы (8) и (11) точнее учитывают физику процесса, поэтому предпочтение следует отдавать данным соотношениям, чем общепринятому положению о том, что распределение температуры теплоносителя вдоль поверхности отопительного прибора имеет линейный характер [4].

С помощью уравнения (21) можно получить третье уравнение статики для определения Q_o :

$$Q_o = cG \left[t_{ex} - t_g - \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}} \right].$$

Таким образом, третий вариант структуры статической модели отопительного прибора представляется следующими уравнениями:

$$\begin{cases} Q_{o3} = cG \left[t_{ex} - t_g - \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}} \right], \\ t_{вых} = t_g + \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}}. \end{cases} \quad (22)$$

Структурная схема модели отопительного прибора в этом случае представлена на рис. 4.

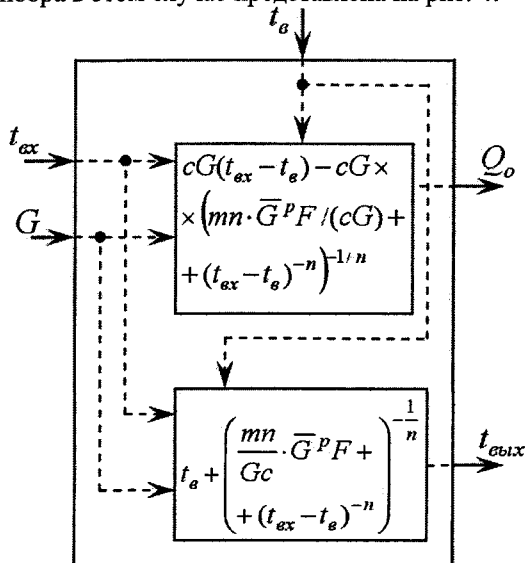


Рис. 4. Структурная схема статической модели отопительного прибора для системы уравнений (22)

Вместе с тем интересно также оценить и количественное различие моделей. Для примера рассмотрим структуры модели из уравнений (5) и (9). Откуда видно, что отношение мощностей отопительного прибора Q_{o2}/Q_{o1} определяется следующим выражением:

$$\frac{Q_{o2}}{Q_{o1}} = \left(1 - e^{-\frac{KF}{cG}} \right) \cdot \left(0,5 + \frac{cG}{KF} \right). \quad (23)$$

Как видно из (23), отношение мощностей является функцией параметра $KF/(cG)$. Представим последний за X и исследуем поведение функции Q_{o2}/Q_{o1} в зависимости от X , для чего проведем прямые вычисления (см. таблицу).

Результаты вычислений Q_{o2}/Q_{o1} по формуле (23)

Q_{o2}/Q_{o1}	0,999992	0,694934	0,599873
$KF/(cG)$	0,01	5,01	10,01
Q_{o2}/Q_{o1}	0,566622	0,549975
$KF/(cG)$	15,01	20,01
Q_{o2}/Q_{o1}	0,50010	0,50005	0,50003
$KF/(cG)$	10000,0	20000,0	30000,0
Q_{o2}/Q_{o1}	0,50003	0,50002
$KF/(cG)$	40000,0	50000,0

Как видно из таблицы, с увеличением параметра $KF/(cG)$ отношение мощностей уменьшается. Для построения графика функции $(Q_{o2}/Q_{o1}) = f(X)$ найдем предельные значения этой функции при X стремящемся к бесконечности и к нулю справа:

$$\begin{aligned} \lim_{X \rightarrow +\infty} \frac{Q_{o2}}{Q_{o1}} &= \\ &= \lim_{X \rightarrow +\infty} \left\{ \left(1 - e^{-X} \right) \cdot \left(0,5 + \frac{1}{X} \right) \right\} = 0,5. \end{aligned} \quad (24)$$

Для вычисления второго предела функции применим правило Лопиталья:

$$\begin{aligned} \lim_{X \rightarrow +0} \left\{ \frac{1 - e^{-X}}{X} \right\} &= \\ &= \lim_{X \rightarrow +0} \left\{ \frac{e^{-X}}{(0,5X + 1)^2} \right\} = \frac{1}{1} = 1. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, график функции $(Q_{o2}/Q_{o1}) = f(X)$ будет иметь вид, приведенный на рис. 5.

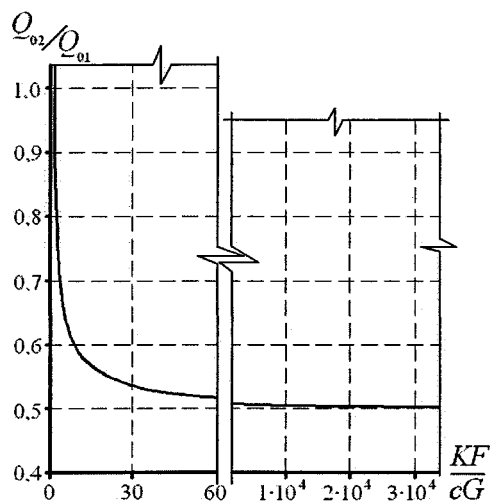


Рис. 5. Графики функции $\frac{Q_{o2}}{Q_{o1}}$

Из рис. 5 видно, при малых значениях параметра $KF/(cG)$, то есть при больших расходах теплоносителя, варианты модели (5) и (9) практически равноценны. При больших значениях этого параметра, имеющих место, очевидно, при малых расходах, мощность отопительного прибора, вычисленная по второму варианту структуры, будет в 2 раза меньше, чем мощность, найденная по первому варианту структуры. Поэтому при прочих равных условиях температурные графики регулирования, построенные на основе первого варианта,

уравнение (5), будут располагаться ниже графиков, построенных на основе второго варианта – уравнение (9). А поскольку физика процесса теплопередачи точнее учитывается вторым вариантом модели чем первым, то теплоснабжение зданий, рассчитанное на основе первого варианта модели (в настоящее время используется именно этот подход) будет приводить к тому, что количество доставленного потребителю тепла не восполнит его тепловую потребность, обусловленную потерями тепла через ограждающие конструкции.

Анализ данных работы [2] говорит о том, что графики распределения температуры теплоносителя вдоль поверхности теплообмена F , вычисленные по второму и третьему вариантам структуры математической модели, практически одинаковы и, очевидно, что при использовании этих структур погрешность в определении теплоотдачи отопительного прибора будет менее значимой.

Вместе с тем это не означает, что одинаковыми будут и вычисленные значения мощностей Q_{o2} и Q_{o3} по формулам (9) и (22), поэтому необходимо выяснить какое количественное различие дают эти формулы.

На рис. 6 приведены графики для относительных значений мощностей отопительного прибора, определенные по всем трем вариантам структуры математической модели для различных входных температур теплоносителя (80, 85 и 95 °C). Указанные на рисунке кривые позволяют провести

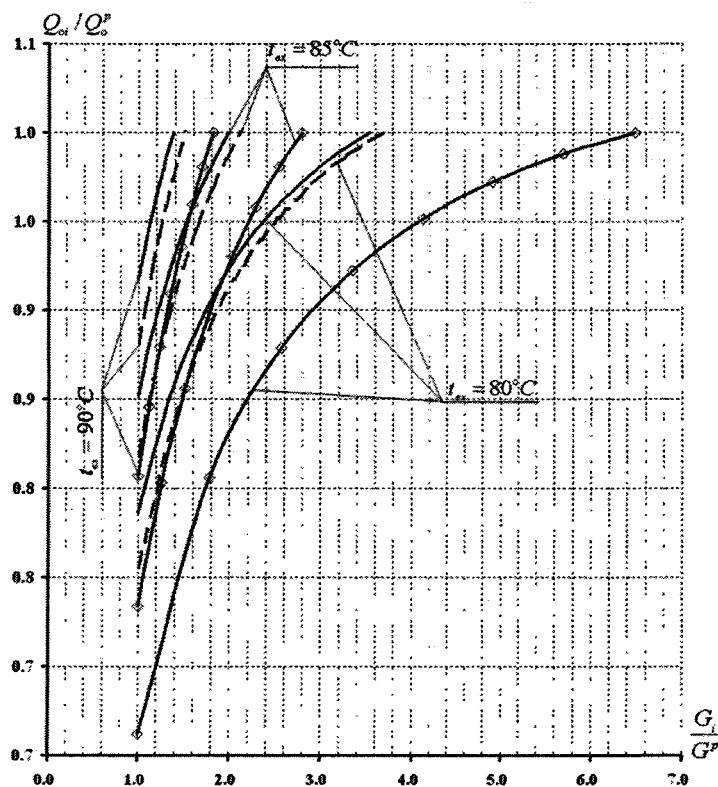


Рис. 6. Кривые изменения мощности отопительного прибора от расхода для различных значений входной температуры теплоносителя

анализ по сходимости результатов расчета между структурами уравнений (5), (9) и (22). Здесь индекс « i » означает номер варианта структуры.

За базовое (расчетное) значение мощности Q_o^p отопительного прибора использовалась величина 1536 Вт, найденная стандартным образом [4] для 10-секционного отопительного прибора М 140 АО. За базовое (расчетное) значение расхода G^p была взята величина 0,015 кг/с, температурный график 95–70 °С.

Расчет проводился методом последовательных приближений путем увеличения расхода теплоносителя и нахождения Q_{oi} до достижения величины, отвечающей значению Q_o^p . Подписи осей абсцисс и ординат обусловлены отношением текущего значения к расчетному, соответственно мощности отопительного прибора и расхода теплоносителя.

Так, сплошные кривые построены по первому уравнению статики (5), пунктирные по второму уравнению статики (9), а сплошные кривые, обозначенные «ромбами», по третьему уравнению статики (22).

Как видно из рис. 6, сплошные и пунктирные кривые практически схожи при данных значениях температуры теплоносителя на входе в отопительный прибор. Такая близость справедлива, так как в структуру уравнений (5) и (9) входит коэффициент теплопередачи, изменение которого не учитывается.

В то же время, кривые, построенные по уравнению (22) отличаются от остальных и учитывают изменения коэффициента теплопередачи во всем диапазоне регулирования. Наиболее явно различие просматривается при значительном снижении t_{ex} , например до 85 °С, когда для достижения расчетного значения мощности расход необходимо увеличить в 6 раз.

Выводы

1. Уравнения (8) и (21) практически равноценны при рассмотрении близких к расчетным условий работы отопительного прибора; кроме того, уравнение (21) позволяет учитывать зависимость коэффициента теплопередачи от среднего значения температурного напора и расхода.

2. При низких входных температурах теплоносителя и больших расходах мощность отопительного прибора, вычисленная по третьему варианту, заметно ниже, чем значения найденные по первому и второму варианту. Также видно, что при высоких входных температурах и практически реальных диапазонах изменения расхода мощности Q_{o2} и Q_{o3} практически одинаковы. Следовательно, при управлении процессом теплоснабжения необходимо учитывать и эту особенность, в частности, при качественно-количественном регулировании.

Литература

1. Монахов, В.Г. Моделирование управления режимами тепловых сетей / В.Г. Монахов, Ю.А. Войтинская. – М.: Энергоиздат, 1995. – 224 с.
2. Денисенко, Ю.Н. «К проблеме построения математических моделей отопительного прибора»: материалы Второй Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» / Ю.Н. Денисенко, В.И. Панферов. – М.: МГСУ, 2007. – С. 101–106.
3. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд., перераб. – М.: Изд-во МЭИ. – 2006. – 472 с.
4. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч 1. Отопление / Богословский В.Н., Крупнов Б.А., Сканиви А.Н. и др. – М.: Стройиздат. – 1990. – 344 с.

Поступила в редакцию 20.01.2008 г.

Денисенко Юрий Николаевич, инженер кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ. Область научных интересов: моделирование процессов управления тепло-гидравлическими режимами в системах теплоснабжения.

Denisenko Yury Nikolaevich, engineer of the Heat and Gas Supply and Ventilation department of South Ural State University. Scientific interests: modelling of managerial processes of warm-hydraulic regimes in systems of heat supply.

Панферов Владимир Иванович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ. Область научных интересов: моделирование и оптимизация технологических процессов и систем, автоматизация технологических объектов.

Panferov Vladimir Ivanovich, Doctor of technical science, professor, head of the Heat and Gas Supply and Ventilation department of South Ural State University. Scientific interests: modelling and optimization of technological processes and systems, automation of technological objects.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОНТАКТНОМ АППАРАТЕ С ПЛЕНОЧНЫМИ ФОРСУНКАМИ

В.П. Семенов, Н.И. Платонов

г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный университет

THE ANALYSIS OF HEAT TRANSFORM IN A CONTACT FILM JET APPARATUS

V.P. Semenov, N.I. Platonov

Magnitogorsk, Magnitogorsk State University

Предложена модель теплообмена между потоком газа и свободной пленкой жидкости, вытекающей из кольцевой щели. Аналитически получены основные параметры процесса: локальные температуры, толщина пограничного слоя. Результаты аналитического расчета согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: исследование теплообмена в контактном аппарате с пленочными форсунками.

There has been developed a model of heat transform between a gas flow and a free liquid film flowing out of an annular slot. The following primary analytical parameters of the process have been identified: local temperatures, and thickness of the boundary layer. The results of the analytical estimation correspond with the experimental data.

Keywords: heat transform, free liquid film, temperature field, boundary layer, open-type heat transformer.

В ряде тепломассообменных аппаратов энергетики и химической технологии происходит непосредственное взаимодействие газа и сплошной жидкостной пленки, вытекающей из кольцевой щели. В реактивном пространстве таких аппаратов газ взаимодействует со сплошной жидкостной пленкой, каплями, на которые распадается струя, и пленкой жидкости, стекающей по стенкам камеры. Существующие методики расчета подобных аппаратов оперируют параметрами, относящимися в целом к контактной камере, не выделяя из общего процесса тепломассообмена вклад каждой из зон. Анализ многочисленных опытных данных, полученных на промышленных и лабораторных установках [1, 2], позволил авторам создать упрощенную математическую модель процесса теплообмена в малоисследованной зоне – в свободной жидкостной пленке.

Рассмотрим установившееся течение осесимметричной жидкостной пленки, вытекающей из кольцевой щели (рис. 1). При взаимодействии жидкостной пленки с газовым потоком в полости тепломассообменного аппарата силы тяжести и поверхностного натяжения, действующие на элемент жидкости и стремящиеся свернуть пленку, компенсируются динамическим напором газа.

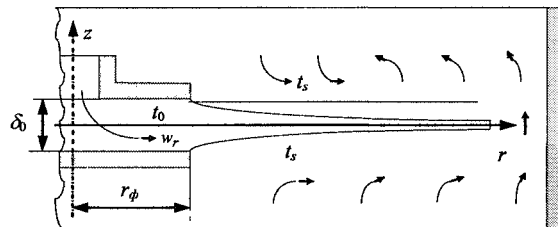


Рис. 1. Схема течения жидкостной пленки

В результате такого взаимодействия форма пленки становится близкой к форме диска, что характерно для многих тепломассообменных аппаратов. Неравномерный профиль скоростей на выходе из сопла достаточно быстро релаксирует к равномерному [3], и затем при взаимодействии с газом мало отличается от равномерного [4]. Длина участка релаксации может быть определена по уравнению $l = C\delta Re$ [5], где значение коэффициента C принято равным $1/24$, как и для случая истечения струи из бесконечной щели, поскольку поперечный размер пленки δ_r в реальных условиях меньше радиуса отбойного диска форсунки r_ϕ на порядок и более. Для некоторых жидкостей, в частности для воды, длина участка релаксации со-

ставляет 0,5–2,5 см, что значительно меньше радиуса разлета жидкостной пленки.

Задача значительно упрощается, если учесть отмеченные выше замечания и пренебречь влиянием пульсаций, обусловленных взаимодействием сил тяжести, инерции, поверхностного натяжения и вязкости. Результаты решения такой задачи могут быть распространены от устья форсунки до места распада струи на капли.

При постановке краевой задачи сделаны следующие предположения: процесс стационарный, свободная жидкостная пленка имеет форму диска, поле скоростей в жидкостной пленке практически равномерно, радиальная скорость и теплофизические параметры жидкости являются величинами постоянными, величина осевого градиента температур много больше радиального.

Запишем уравнение распространения тепла в жидкостной пленке в цилиндрических координатах, полагая, что осевой градиент температур много больше радиального градиента и радиальная скорость жидкости w_r значительно больше осевой скорости w_z :

$$w_r \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Начальные условия на выходе из сопла:

$$r = r_\phi, \quad t = t_0. \quad (2)$$

Граничные условия определим из условия, что на поверхности струи температура жидкости равна температуре насыщения:

$$z = \pm \frac{1}{2} \delta_r, \quad t = t_s. \quad (3)$$

При заданных условиях теплообмена задача становится симметричной и начало координат удобно поместить на оси струи, как показано на рис. 1. Условие симметрии запишем в виде:

$$z=0, \quad \frac{\partial t}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Введем безразмерные координаты. Обозначим $R = r/r_\phi$, $Z = z/\delta_r$, $\vartheta = (t_s - t)/(t_s - t_0)$, где r_ϕ и r – радиус форсунки и текущий радиус струи; δ_r – поперечный размер струи на удалении r от сопла форсунки; t_0 , t_s – начальная температура струи и температура насыщения. Экспериментальные исследования динамики свободной жидкостной пленки, представленные в [6], показывают, что скорость жидкости вдоль радиуса можно считать постоянной. Тогда из закона сохранения массы $2\pi r w_0 \delta_0 r_\phi = 2\pi r w_r \delta_r r$ выразим поперечный размер пленки

$$\delta_r \frac{\delta_0 r_\phi}{r} = \frac{\delta_0}{R}. \quad (5)$$

С учетом последнего выражения и новых переменных R и Z уравнение (1) запишем в виде

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial R} = R^2 \frac{L_\phi}{Pe} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial Z^2} - \frac{Z}{R} \frac{\partial \vartheta}{\partial Z}, \quad (6)$$

где $Pe = \frac{\delta_0 w_r}{a}$ – число Пекле, $L_\phi = \frac{r_\phi}{\delta_0}$ – геомет-

рическая характеристика форсунки. Начальные (2) и граничные (3) условия примут вид:

$$R=1, \quad \vartheta=1; \quad (7)$$

$$Z = \pm \frac{1}{2}, \quad \vartheta = 0. \quad (8)$$

Условие симметрии в безразмерных координатах примет вид:

$$Z=0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial Z} = 0. \quad (9)$$

Краевая задача (6)–(9) решена численными методами. Расчет средней температуры $\bar{\vartheta}$ в сечении R представлен на рис. 2. Задача решена для чисел Пекле и параметра L_ϕ характерных для режимов эксплуатации контактного теплообменника [1].

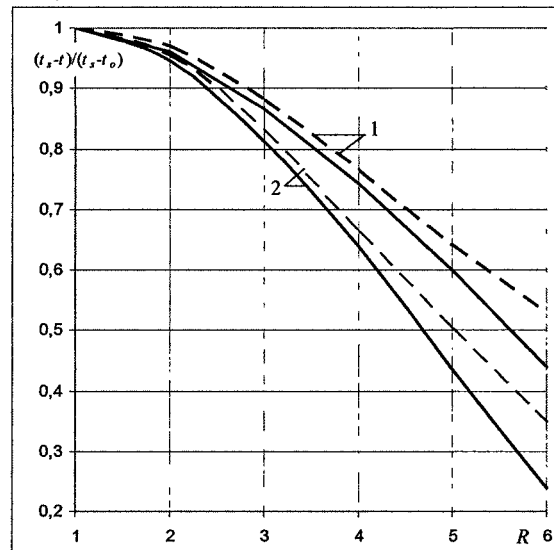


Рис. 2. Относительный прогресс жидкостной пленки: 1 – $(L_\phi/Pe)=0,0005$, 2 – 0,001; прерывистая линия – численный расчет, сплошная линия – расчет по формуле (12)

Предположим, что в уравнении (6) второе слагаемое в правой части с увеличением радиуса незначительно влияет на распределение температуры в пленке. Тогда уравнение теплообмена запишем в виде

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial R} = R^2 \frac{L_\phi}{Pe} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial Z^2}. \quad (10)$$

Краевую задачу (7)–(10) можно решить методом разделения переменных:

$$\vartheta = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n 4}{\beta_n} \exp(-\beta_n^2 (L_\phi/Pe)(R^3 - 1)) \cos \beta_n Z, \quad (11)$$

где $\beta = (2n + 1)\pi$.

Уравнение (11) позволяет определить температуру жидкости в любой точке струи. На рис. 3

представлено распределение температуры в пленке на различном удалении от форсунки для характерного режима работы контактного теплообменника с пленочными форсунками. Для такого случая расчеты показывают, что верхний и нижний тепловые пограничные слои соединяются на расстоянии $R=3,5$.

Используя теорему о среднем определим среднюю температуру жидкости в сечении R

$$\bar{\vartheta} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \vartheta dZ = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{\beta_n^2} \exp(-\beta_n^2(L_\phi/Pe)(R^3-1)) \cdot (12)$$

Расчет средней температуры жидкости в сечении R , выполненный по формуле (12), представлен на рис. 2. Так как сплошность пленки воды сохраняется на расстояниях $R=1-4,5\dots 5,5$ [6], то в этом диапазоне можно отметить хорошее соответствие численного и аналитического расчетов и справедливость принятого упрощения в отношении уравнения (6).

На рис. 4 представлены расчетные и опытные данные по теплообмену в жидкостной пленке. Опыты проведены на лабораторной установке [2], в которой свободная жидкостная пленка контактировала с продуктами сгорания дизельного топлива. За температуру t_s взята температура мокрого термометра входящих газов, являющейся предельной температурой нагрева воды в контактных аппаратах. В расчетное уравнение (12) заложены исходные параметры, создаваемые в экспериментальной установке, но при этом обнаружилось расхождение расчетных и опытных данных – в среднем на 38% (рис. 4). Объяснение такого расхождения может быть следующее.

В опытах газ поступает в контактную камеру снизу и основной нагрев струи происходит через нижнюю поверхность, затем газ огибает жидкост-

ную пленку у стенки контактной камеры и далее на некотором расстоянии основной поток газа сосредотачивается у стенки контактной камеры. Над пленкой образуется застойная зона с небольшой циркуляцией уже частично охлажденного газа. В этой зоне интенсивность теплообмена низка и не обеспечивается прогрев поверхностного слоя пленки до температуры насыщения входящих газов. Таким образом, условие (8) на верхней поверхности пленки в опытах не выполнялось.

Для учета этого фактора сформулируем новую краевую задачу, в которой будем считать верхнюю поверхность жидкостной пленки теплоизолированной. Для удобства решения ось OZ свяжем с нижней поверхностью жидкостной пленки. Значения Z будут меняться от 0 до 1. В краевой задаче (7)–(10) уравнение теплопроводности (10) и начальное условие (7) остаются без изменений, условие симметрии (9) не соблюдается, а граничные условия (8) примут вид:

$$\text{при } Z=0 \quad \vartheta=0, \quad (13)$$

$$\text{при } Z=1 \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial Z}=0. \quad (14)$$

Решение краевой задачи (10), (7), (13), (14) также проведем методом разделения переменных. Ее решение имеет вид:

$$\vartheta = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(1-\cos\beta_n)}{\beta_n - \sin\beta_n \cos\beta_n} \exp(-\beta_n^2(L_\phi/Pe)(R^3-1)) \sin\beta_n Z, \quad (15)$$

$$\text{где } \beta_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi.$$

На рис. 5 представлено распределение температуры в жидкостной пленке на различном удалении от форсунки, рассчитанное по уравнению (15) при значении $(L_\phi/Pe)=0,0021$.

Средняя температура жидкости в сечении R

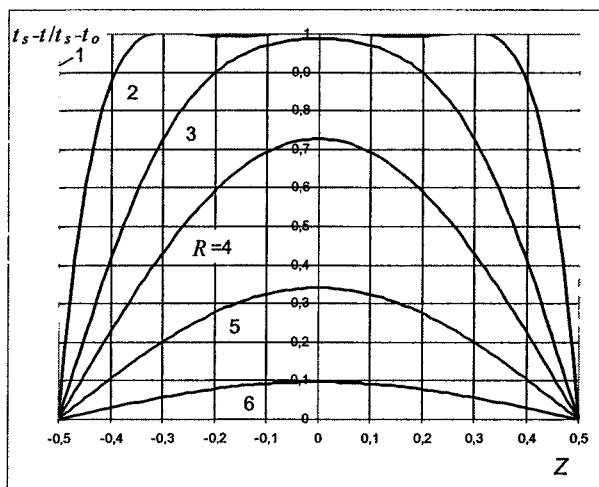


Рис. 3. Распределение температуры в жидкостной пленке: нагрев с двух сторон, $(L_\phi/Pe)=0,0021$

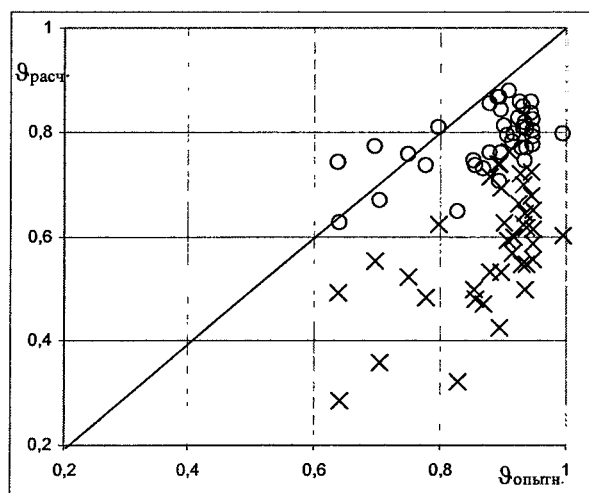


Рис. 4. Соотношение опытных и теоретических данных по теплообмену в жидкостной пленке: x – расчет по уравнению (12), o – расчет по уравнению (16)

$$\bar{\vartheta} = \int_0^1 \vartheta dZ = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(1-\cos\beta_n)^2}{\beta_n(\beta_n - \sin\beta_n \cos\beta_n)} \exp(-\beta_n^2(L_\phi/Pe)(R^3-1)) \cdot (16)$$

На рис. 4 сопоставлены опытные данные по теплообмену в свободной жидкостной пленке и расчетные данные по уравнению (16). Расхождение составляет в среднем 9,3 %.

Полученные выше уравнения позволяют приближенно решать задачу теплообмена в контактном аппарате с пространственными жидкостными пленками. Более точные данные, на наш взгляд, можно получить численным экспериментом, рассматривая сопряженную задачу теплообмена между газом и свободной жидкостной пленкой. В то же время уравнения (11), (12), (15) и (16) могут служить основой в постановке и отладке такого численного эксперимента.

Рассмотрим возможности упрощения расчета уравнений (11), (12), (15) и (16). Анализ сходимости ряда выполнен с помощью программы обработки электронных таблиц Excel, установленной в компьютере типа IBM. В [7] приведено классическое решение задачи теплообмена в плоской неограниченной пластине. Приведенный в [7] ряд при числе Фурье $\geq 0,3$ становится настолько быстро сходящимся, что распределение температуры достаточно точно можно описать первым членом ряда. Аналогичная зависимость выполняется для рядов, приведенных выше, но только в отношении комплекса L_ϕ/Pe . Кроме того, исследования показали, что ряд при фиксированном значении L_ϕ/Pe существенно сходится с удалением от сопла. Это объясняется тем, что безразмерный ра-

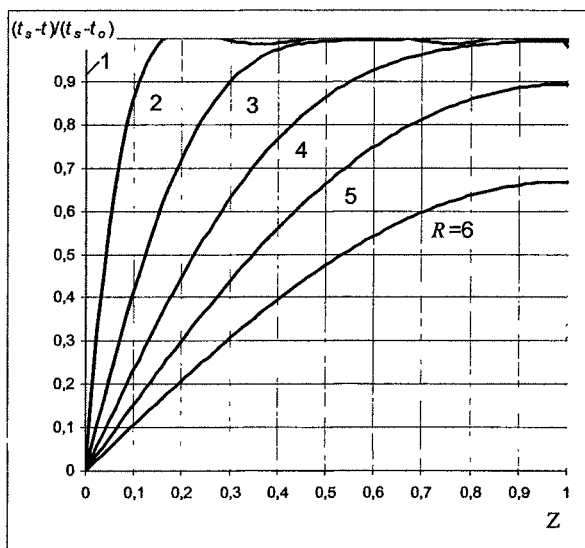


Рис. 5. Распределение температуры в жидкостной пленке: нагрев с одной стороны, $(L_\phi/Pe) = 0,0021$

диус пленки R имеет показатель степени 3. Очевидно, что для уравнений (11), (12), (15) и (16) вопрос об ограничении ряда в практических расчетах необходимо решать по показателю $(L_\phi/Pe)(R^3-1)$, который при значениях $< 0,3$ может обеспечить достаточную точность вычислений (рис. 6). Обозначив в уравнениях (11), (12), (15) и (16) коэффициенты ряда в виде

$$\vartheta = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp(-\beta_n^2(L_\phi/Pe)(R^3-1)) \cos(\sin\beta_n)Z,$$

приведем их значения:

Коеф-ты уравнения	β_n (11),(12)	A_n (11)	A_n (12)	β_n (15),(16)	A_n (15)	A_n (16)
n=0	3,141593	1,27324	0,810569	1,570796	1,27324	0,810569
n=1	9,424778	-0,42441	0,090063	4,712389	0,424413	0,090063
n=2	15,70796	0,254648	0,032423	7,853982	0,254648	0,032423
n=3	21,99115	-0,18189	0,016542	10,99557	0,181891	0,016542
n=4	28,27433	0,141471	0,010007	14,13717	0,141471	0,010007
n=5	34,55752	-0,11575	0,006699	17,27876	0,115749	0,006699

Выводы

Сформулирована математическая модель теплообмена в сплошной жидкостной пленке и получено аналитическое решение в виде быстро сходящегося ряда.

1. Проведено сравнение экспериментальных данных с аналитическими решениями для двух вариантов граничных условий.

2. Показано, что для принятой схемы движения теплоносителей можно пренебречь теплообменом в кормовой зоне сплошной жидкостной пленки, обтекаемой поперечным потоком газа.

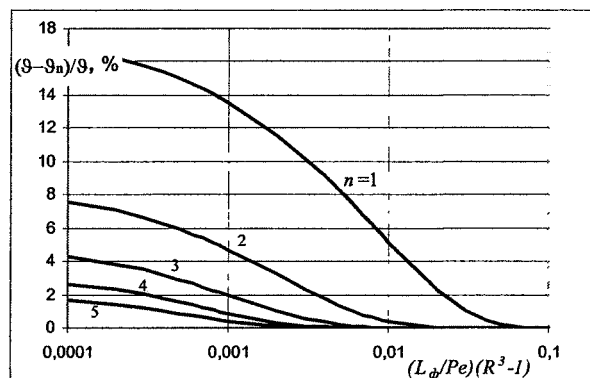


Рис. 6. Относительная погрешность в определении средней температуры жидкостной пленки по n членам ряда уравнения (16)

Литература

1. Семенов, В.П. Эффективность контактных теплообменников с рециркуляцией нагреваемой воды / В.П. Семенов, Н.И. Платонов, В.М. Лимитовский // Судостроительная промышленность. Серия «Промышленная энергетика, охрана окружающей среды и энергосбережение судов». – 1991. – Вып.15. – С. 13–17.
2. Платонов, Н.И. Исследование тепло- и массообмена между свободной пленкой жидкости и поперечным потоком газа в контактном теплообменнике: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Н.И. Платонов. – Магнитогорск: Изд-во МГПИ, 1998. – 23 с.
3. Етихин, В.Е. О течении закрученных кольцевых струй капельной жидкости в окружающей среде / В.Е. Етихин // Вестн. Моск. ун-та. Серия «Математика, механика». – 1978. – № 1. – С. 74–83.
4. Сысоев, Г.М. Течение и устойчивость свободной осесимметричной пленки жидкости / Г.М. Сысоев, В.Я. Шкадов // Изв. АН СССР, МЖГ. – 1988. – № 5. – С. 23–29.
5. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг – М.: Наука, 1974.
6. Численное и экспериментальное исследование свободных пленок тонких куполообразных пленок движущейся жидкости / Э.Ф. Шургальский, В.Л. Коленков, И.Х. Еникеев, А.В. Петренко. – М., 1984. – Деп. в ОНИИТЭхим, №64хп-Д84.
7. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

Поступила в редакцию 10.09.2008 г.

Семенов Владимир Петрович. Кандидат технических наук, профессор, ректор Магнитогорского государственного университета, г. Магнитогорск. Область научных интересов – теплофизика, теоретическая теплотехника, гидродинамика и тепломассообмен при конденсации пара. E-mail: semenov@masu.ru.

Semenov Vladimir Petrovich. Candidate of technical sciences, professor, Rector of Magnitogorsk State University, Magnitogorsk; does research in thermal physics, heat engineering, hydrodynamics, and heat-mass transform at steam condensation. E-mail: semenov@masu.ru.

Платонов Николай Иванович. Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики Магнитогорского государственного университета, г. Магнитогорск. Область научных интересов – теплофизика, теоретическая теплотехника, гидродинамика и тепломассообмен в аппаратах энергетики и металлургии, утилизации теплоты вторичных энергоресурсов. E-mail: platonov@masu.ru.

Platonov Nikolay Ivanovich. Candidate of technical sciences, associate professor, Head of the Department of Physics at Magnitogorsk State University, Magnitogorsk; does research in thermal physics, heat engineering, hydrodynamics, and heat-mass transform in power engineering, metallurgical, and heat waste disposal energy resource devices. E-mail: platonov@masu.ru.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗОЛЯЦИЮ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ НА ОСНОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А.В. Коржов, Е.Ю. Юрченко
г. Челябинск, ЮУрГУ

DETERMINATION OF THE SOIL AND CLIMATIC PARAMETERS INFLUENCE ON INSULATION OF POWER CABLE LINE ON THE GROUND OF STATISTICAL DATA

A. V. Korzhov, E. Y. Yurchenko
Chelyabinsk, SUSU

На основе анализа статистических данных о повреждаемости изоляции кабельной сети и метеорологических данных показана взаимосвязь грунтово-климатических параметров с текущим состоянием изоляции силовых кабелей.

Ключевые слова: силовая кабельная линия, климатические параметры, параметры грунта, корреляция, ресурс.

Grounding on the analysis of statistical data about damages of cable network insulation and meteorological data the interconnection between soil and climatic parameters and current state of power cable line insulation is shown.

Keywords: power cable line, climatic parameters, soil parameters, correlation, resource.

В условиях эксплуатации на силовые кабельные линии (КЛ), проложенные непосредственно в грунте, воздействует множество эксплуатационных факторов. Вследствие их влияния в изоляции кабеля происходят изменения, приводящие к старению, ухудшению свойств и разрушению изоляции. На основании многолетних исследований было установлено, что одним из воздействующих факторов, приводящих к выходу кабеля из строя, является повышенная температура [1]. Зависимость для расчёта ресурса изоляции от температуры имеет вид (1):

$$\tau = Be^{\frac{W}{RT}}, \quad (1)$$

где W – условная энергия активации процесса разрушения; B – коэффициент, зависящий от конструкции и применяемых материалов; R – постоянная Больцмана, T – температура.

Температура изоляции зависит как от величины тока, протекающего по жилам кабеля, так и от состояния грунта (состав, температура, влажность), в котором проложена КЛ.

На основании статистического материала по повреждаемости изоляции кабельной сети одного

из районов г. Челябинска установлен ряд распределения пробоев изоляции по годам (рис. 1). Выборка состоит из 361 кабельной линии с бумажно-пропитанной изоляцией напряжением 6–10 кВ и протяженностью 155,2 км.

Сравнивая повреждаемость изоляции кабелей в разные годы, можно констатировать, что в целом повреждаемость возрастает. Однако нередко уровень повреждаемости следующего года оказывается ниже предыдущего. Иногда рост по сравнению с предыдущим годом значительно возрастает, а иногда резко снижается. Следовательно, рост повреждаемости наблюдается в среднем как тенденция. В отдельные годы уровни повреждаемости испытывают колебания, отклоняясь от основной тенденции. Тенденция динамики связана с действием долговременно существующих причин, определяющих процесс старения изоляции, как правило, это режимные параметры. Колебания, напротив, связаны с действием кратковременных или циклических факторов и, вероятно, определяются изменениями погодных условий.

По данным метеорологической службы установлено, что период с 1990 по 1993 года для г. Че-

лябинска – засушливый, характеризующийся минимальным количеством пробоев, а, начиная с 1998 года, – полноводный период, когда наблюдается рост повреждаемости КЛ. Одной из влияющих причин является значительное увлажнение грунта (рис. 1).

товых массивов, в которых проложена кабельная линия.

Из общей картины выделяются два характерных пика: май и октябрь. Май и октябрь – это переходные месяцы, когда наблюдается интенсивное выпадение осадков в виде дождя и мокрого снега и

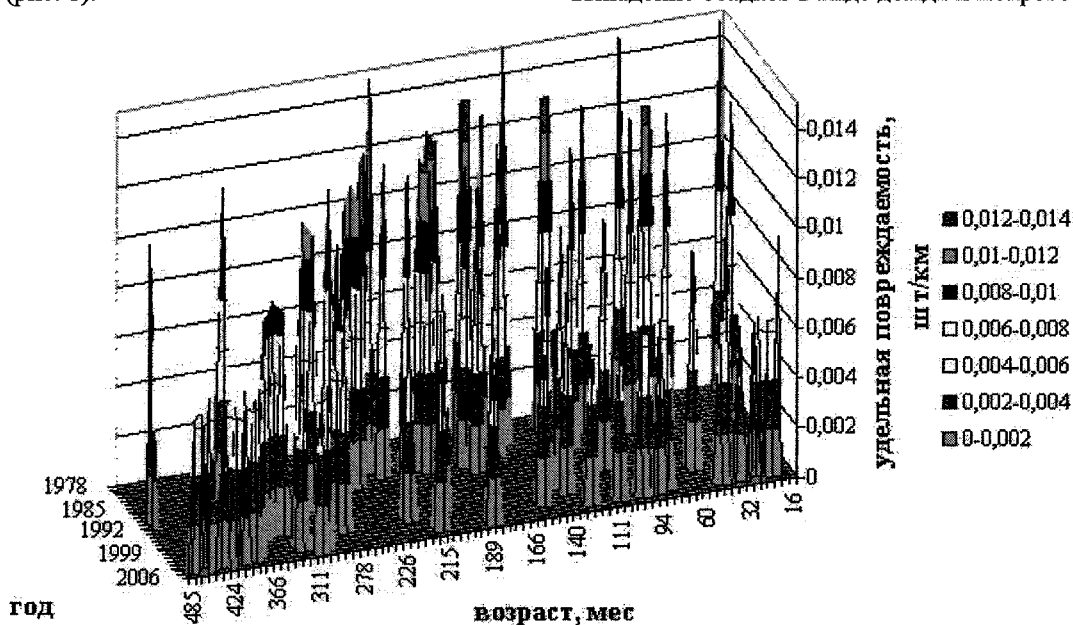


Рис. 1. Удельная повреждаемость изоляции КЛ в зависимости от срока эксплуатации по годам

Влияние погодных условий можно оценить, рассматривая повреждения изоляции в течение годового цикла. Большинство всех аварийных выходов КЛ на основании многолетних наблюдений приходится на осенне-весенний период (рис. 2). Повреждаемость кабелей в течение года непостоянна, а происходит с колебаниями, причём существует тенденция, ведущая к увеличению числа повреждений от пика к пику. Причинами этого могут являться климатические факторы (температура, влажность, давление и др.) и поведение грун-

происходят колебания от положительной температуры до заморозков. Объём воды, проникающей в грунт, увеличивается при её замерзании до 9 %. Рост объёма грунта при его промерзании сопровождается резким увеличением влажности грунта с образованием в нём льда в виде линз и других включений. В результате появляются места выпучивания кабеля при оттаивании и возникают растягивающие усилия [2, 3, 4]. Пучение грунта развивается вследствие притока плёночной воды к фронту промерзания из нижележащих слоёв

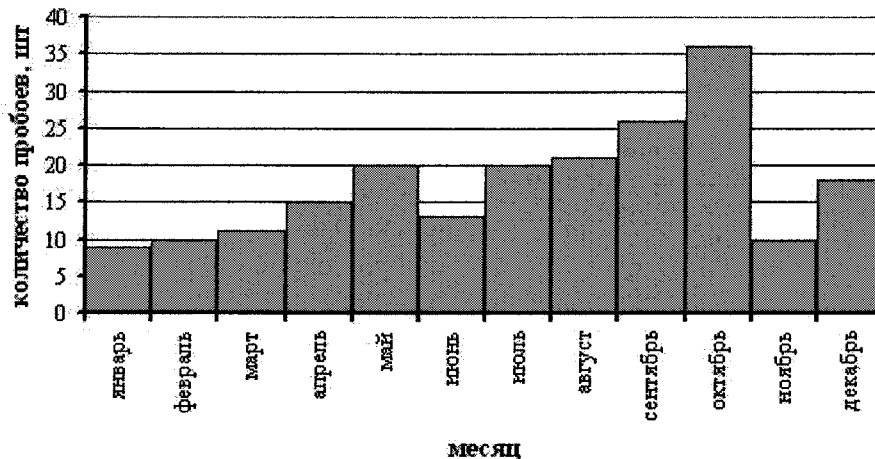


Рис. 2. Усредненная зависимость числа повреждений КЛ от времени по месяцам

(рис. 3). Миграция влаги происходит вследствие разности сил притяжения молекул воды к поверхности твёрдых частиц [5].

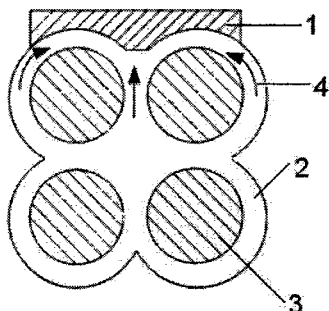


Рис. 3. Схема миграции влаги к фронту промерзания: 1 – кристаллы льда, 2 – гидратные оболочки, 3 – твердая частица, 4 – влага

Появившиеся из-за промерзания грунтов и под влиянием весеннего увлажнения грунта дефекты изоляции в первый пик (май) проявляются во втором пике (октябрь) с большей силой. Степень увлажнения грунтов в значительной мере предопределяется размерами и минералогическим составом слагающих их частиц: галечные (щебень), гравелистые (дресва), песчаные, пылеватые и глинистые [5, 6]. Наиболее часто в городских условиях встречаются грунты, состоящие из смеси песчаных, гравелистых и глинистых частиц. Влажность их на уровне прокладки кабеля составляет от 4 до 20 %.

В условиях города под влиянием местных нагрузок (например, дорога или проезжающий транспорт) происходит уплотнение грунта, что вызывает уменьшение его пористости и, следовательно, влажности в «нагруженных» местах. Значит, во время уплотнения грунта вода выдавливается. Она должна пройти некоторый путь в толще грунта, отфильтроваться через него. Процесс уплотнения зависит от скорости отжатия воды из пор. Ранее установлено, что движение воды в порах грунта происходит в соответствии с законом

ламинарной фильтрации – скорость фильтрации прямо пропорциональна гидравлическому градиенту [6]. Математическое выражение этого закона, предложенное Дарси, имеет вид (2):

$$v_f = k_f \cdot i, \tag{2}$$

где v_f – скорость фильтрации, или объём воды, проходящий через единицу площади поперечного сечения грунта в единицу времени; k_f – коэффициент фильтрации, равный скорости фильтрации при гидравлическом градиенте $i=1$; i – гидравлический градиент, равный потере напора (H), отнесённой к пути фильтрации L (3):

$$i = \frac{H_2 - H_1}{L}. \tag{3}$$

Значение коэффициента фильтрации может находиться в больших пределах в зависимости от гранулометрического состава и плотности грунтов.

На рис. 2 представлена усреднённая зависимость числа повреждений КЛ по месяцам, но не всегда климатические параметры одного и того же месяца повторяются из года в год (рис. 4). Поэтому при усреднении параметров теряется достоверность в определении связи между климатическими факторами и числом повреждений.

Рассмотрим 2002 и 2006 года. В эти годы с января по сентябрь характер изменения повреждаемости изоляции одинаков с разницей в абсолютных значениях, а с октября значительно отличается (рис. 5).

Для выяснения возможных причин расхождения были рассмотрены погодные условия для данных лет (рис. 6). Для анализа выделены следующие грунтово-климатические параметры: среднемесячная температура на поверхности грунта, среднемесячная температура в грунте на глубине 0,8 м и среднемесячное количество осадков, выпавших в данном месяце.

Коэффициент корреляции между температурой в грунте и температурой на поверхности грунта, вычисленный по формуле (4), равен $r = 0,8$.

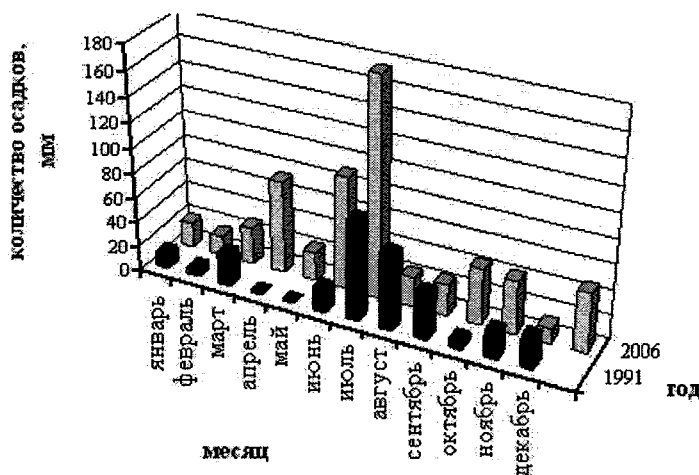


Рис. 4. Количество выпавших осадков за 1991 и 2006 годы

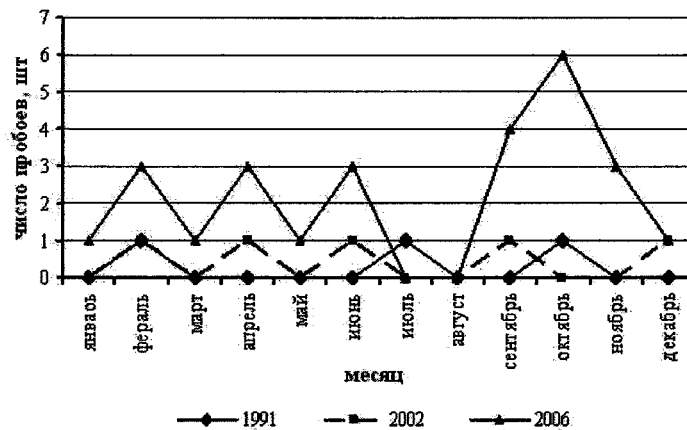


Рис. 5. Повреждаемость изоляции за 1991, 2002 и 2006 годы

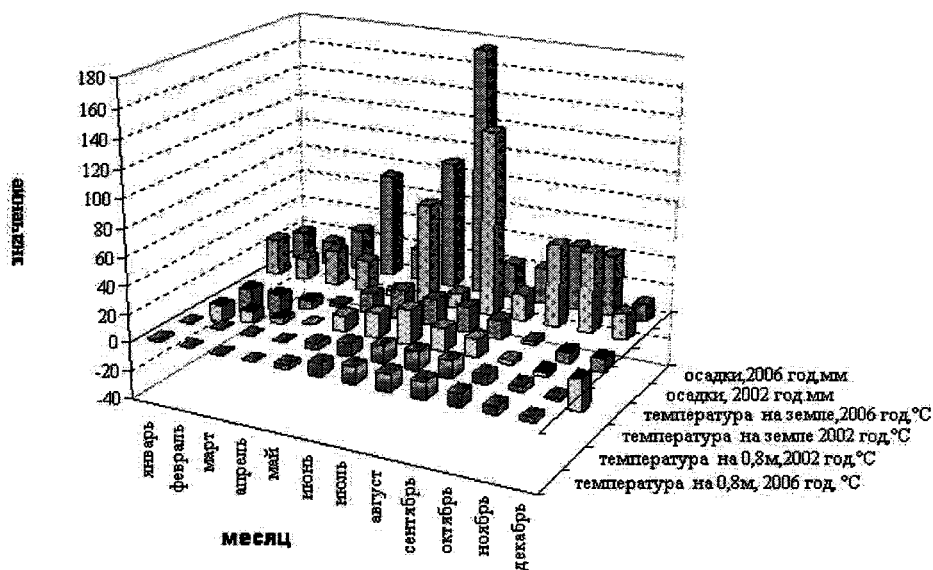


Рис. 6. Среднемесячные грунтово-климатические параметры

Линейная положительная связь свидетельствует о том, что при повышении температуры на поверхности грунта наблюдается повышение температуры и на глубине прокладки КЛ, и наоборот. На температуру окружающей среды влияет режим осадков с коэффициентом корреляции $r = 0,48$.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{(n-1)s_x s_y}, \quad (4)$$

где x_i и y_i – значения рассматриваемых параметров; \bar{X} и \bar{Y} – их средние значения; s_x и s_y – их стандартные отклонения; n – количество пар значений.

Известно, что пробой изоляции происходит не мгновенно. Постепенное накопление и развитие дефекта занимает некоторое время, зависящее как от площади дефекта, так и от параметров окружающей среды. Это обстоятельство необходимо

учитывать при сопоставлении количества пробоев в месяце с грунтово-климатическими параметрами. Для этого ряд распределения пробоев должен опережать ряд климатических параметров на 3–4 месяца – время «жизни» дефекта [7].

За период с апреля по сентябрь гистограммы осадков для 2002 года и для 2006 года одинаковы по форме с той лишь разницей, что в 2006 году их количество было больше, что и сказывается на числе повреждений в данный год (см. рис. 5). В октябре и ноябре число повреждений резко отличается: в 2002 году повреждений нет, 2006 году – 6 шт. и 3 шт. соответственно. В 2006 году за июнь-сентябрь выпало 315,9 мм осадков (229,3 мм в 2002 году за тот же период) при средней температуре на поверхности грунта за три месяца 17,7 °С (17,5 °С в 2002 году). Осадки, выпавшие в 2006 году, не успевают испариться и уходят в почву. В результате происходит увлажнение грунта, способствующее растворению солей, образованию

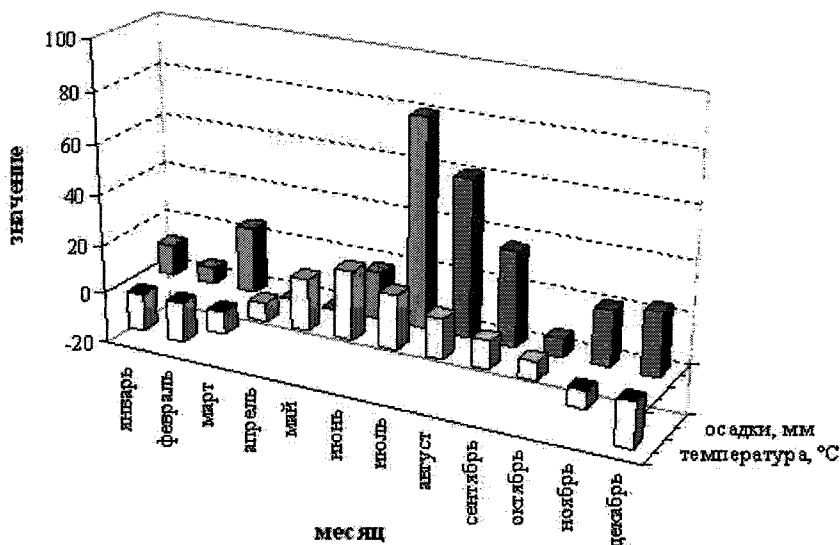


Рис. 7. Климатические параметры 1991 года

кислот и слабых электролитов в грунте, ускорению химических процессов, распространению блуждающих токов. Все это, в свою очередь, приводит к электрохимической коррозии металлической оболочки кабеля, а также при повышенных температурах – к проникновению молекул воды в поры шлангового покрытия кабеля вследствие гибкости цепи полимера. В 2002 году осадки, выпавшие в июне (70,5 мм), под действием положительных температур (+19,8 °C) частично испаряются, а осадки, выпавшие в августе – 129,6 мм, октябре – 58 мм, ноябре – 56,8 мм, способствуют пробоям в декабре.

Годовое количество выпавших осадков за 2002 год составляет 454,2 мм, за 2006 год – 579,3 мм. Для сравнения был рассмотрен засушливый 1991 год (рис. 5) с годовым количеством осадков 295,7 мм. В этом году пробой происходит в трёх месяцах: февраль, июль и октябрь. Анализируя климатические параметры года можно утверждать следующее: высокие температуры и дефицит влаги (рис. 7) создают благоприятные условия для почвенной засухи. Суховей усиливает вредное воздействие засухи, так как температура в суховейном потоке в дневные часы, как правило, превышает 30 °C, а влажность воздуха понижается до 30 % [8]. Ветер увеличивает испарение и усиливает суховейный эффект. При отсутствии осадков в апреле и мае грунт пересыхает, вследствие чего образуются трещины в почве. Из-за выпавших осадков в июне и июле вся вода проникает в грунт по образованным каналам. В этом случае возможно непосредственное попадание влаги на изоляцию, а также за счёт увлажнения происходит увеличение грунта в объёме и по массе, следовательно, наблюдается деформация грунтовых массивов, ведущих к изменению расположения кабеля в земле и образованию растягивающих усилий.

Таким образом, на основе сопоставления статистических данных о повреждаемости изоляции кабельной сети с климатическими параметрами, в частности, с количеством выпавших осадков, температурой на поверхности грунта и на глубине прокладки кабеля, выявлен один из факторов, влияющих на состояние изоляции, – грунтово-климатический. В зависимости от состава грунта влияние этого фактора будет изменяться за счёт изменения таких его характеристик, как вязкость и уплотняемость. Поэтому при определении остаточного ресурса изоляции кабеля и составлении прогноза повреждаемости изоляции, необходимо учитывать поведение грунта под воздействием климатических параметров для каждой КЛ в отдельности.

Литература

1. Канискин, В.А. *Неразрушающий метод определения ресурса электрических кабелей с полимерной изоляцией в условиях эксплуатации* / В.А. Канискин, Э.М. Костенко, А.И. Таджибаев // *Электричество*. – 1995. – № 5. – С. 19–23.
2. Малышев, М.В. *Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): учебное пособие* / М.В. Малышев, Г.Г. Богатырёв. – М.: Изд-во АСВ, 2000. – 320 с.
3. Баранов, Б.М. *Сооружение и эксплуатация кабельных линий* / Б.М. Баранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 632 с.
4. Коржов, А.В. *Напряжённо-деформированные состояния грунтовых массивов, взаимодействующих с силовыми кабелями 6–10 кВ* / А.В. Коржов, Э.Л. Толмачев, А.И. Сидоров, Э.О. Балабуркин // *Электробезопасность*. – 2005. – № 4. – С. 38–43.
5. Иванов, П.Л. *Грунты и основания гидротехнических сооружений: учебник для гидротехн.*

спец. вузов / П.Л. Иванов. – М.: Высш. шк., 1985. – 352 с.

6. *Механика грунтов. Ч. 1. Основы геотехники в строительстве: учебник* / Б.И. Далматов, В.Н. Бронин, В.Д. Карлов и др.; под ред. Б.И. Далматова. – М.: АСВ; СПб.: СПбГА-СУ, 2000. – 204 с.

7. Мусин, А.Х. *Оценка продолжительности*

жизни дефектов изоляции кабелей 6–10 кВ городской электрической сети / А.Х. Мусин // *Промышленная энергетика*. – 1998. – № 6. – С. 10–11.

8. *Природа Челябинской области* / М.А. Андреева, В.А. Бакунин, З.Ф. Кривопалова и др. – Челябинск: ЧГПУ, 2000. – 269 с.

Поступила в редакцию 10.12.2007 г.

Коржов Антон Вениаминович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электромагнитные процессы в кабельных сетях, оценка остаточного ресурса изоляции силовых кабелей.

Korzhov Anton Veniaminovich. Candidate of technical sciences, associated professor of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: electromagnetic processes in cable networks, estimation of power cable insulation remaining life.

Юрченко Екатерина Юрьевна. Аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – изучение состояния изоляции силовых кабельных линий под воздействием эксплуатационных факторов.

Yurchenko Ekaterina Yurievna. Graduate student of the Life Safety department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: study of insulation power cable lines condition under the influence of working factors.

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ГАШЕНИЯ ПОЛЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

*Е.Я. Крекер, А.Н. Андреев
г. Челябинск, ЮУрГУ*

WAY AND DEVICE OF SYNCHRONOUS GENERATOR FIELD SUPPRESSION

*E.J. Kreker, A.N. Andreev
Chelyabinsk, SUSU*

Рассматривается комплексное устройство, позволяющее гасить поле синхронного генератора и выполнять функции резистора самосинхронизации. Для ускорения гашения поля применен ступенчатый принцип увеличения сопротивления контура возбуждения.

Ключевые слова: синхронный генератор, устройство гашения поля, контур возбуждения, преобразователь, обмотка возбуждения.

The complex device allowing to suppress the field of synchronous generator and to perform the functions of the resistor of self-synchronization is considered. The step principle of resistance increase of contour of excitation is applied to accelerate the field suppression.

Keywords: synchronous generator, device of clearing of a field, contour of excitation, rectifier, winding of excitation.

Гашение поля синхронного генератора – это операция, заключающаяся в снижении магнитного потока машины до величины, близкой к нулю, которая проводится как при плановых, так и при аварийных отключениях генератора от сети [1, 2]. При плановом отключении одновременно с разгрузкой генератора снижают и его ток возбуждения для поддержания напряжения на его выводах близким к номинальному. Этот процесс проводится до тех пор, пока ток возбуждения не снизится до значения тока холостого хода генератора.

Необходимость в аварийном отключении генератора от сети возникает при повреждениях в энергосистеме или при повреждениях в зоне действия дифференциальной защиты генератора или блока генератор – трансформатор. В первом случае после отключения генератора от сети напряжение на его выводах резко возрастает до значения, соответствующего его ЭДС, что значительно выше номинального и нежелательно как для его изоляции, так и для изоляции подключенного к нему оборудования (блочного, выпрямительного трансформаторов и др.). Во втором случае к гашению поля предъявляются особые требования, поскольку, чем больше время горения дуги при этом повреждении, тем не только больше объем разрушения в месте КЗ, но и выше вероятность повреждения изоляции под действием дуги на других узлах генератора (например, развитие двухфазного

КЗ в трехфазное) и рядом стоящего оборудования. Кроме того, машина при близком коротком замыкании (КЗ) испытывает динамический удар, и силы, возникающие при этом, стремятся отогнуть лобовые части статорной обмотки, что может привести к дополнительному повреждению изоляции этих частей и дорогостоящему ремонту.

При пробоях изоляции дуга горит до тех пор, пока ЭДС генератора не снизится до величины, недостаточной для ее поддержания. Проведенные опыты показали, что при напряжении 500 В происходит естественное погасание дуги переменного тока внутри машины [1, 2]. Для снижения ущерба от повреждения при такой аварии магнитный поток (ток возбуждения) как можно быстрее должен быть снижен до величины, практически равной нулю.

Как правило, для гашения поля используют контур возбуждения генератора, поскольку напряжение на обмотке возбуждения (ОВ) является единственным параметром, который одновременно влияет на время гашения поля и, в то же время, является доступным для воздействия на него при гашении поля в различных условиях. На ОВ при гашении поля создается отрицательное напряжение, под действием которого ток возбуждения машины снижается до нуля. Чем выше значение этого напряжения, тем быстрее гасится поле.

На сегодняшний день применяются следующие способы гашения поля: гашение поля выводом энергии в сеть переменного напряжения (в тиристорных СВ), гашение поля рассеиванием энергии магнитного поля ОВ на дугогасительной решетке выключателя, гашение поля рассеиванием энергии на резисторе с линейным сопротивлением и на резисторе с нелинейным сопротивлением [3]. Как показывалось в [3] устройства, реализующие эти способы, различны по эффективности (скорости гашения поля) и стоимости. При гашении поля инвертированием или на резисторе с линейным сопротивлением время гашения поля оказывается большим, что говорит о недостаточной эффективности этих способов. С другой стороны устройства, осуществляющие гашение поля на резисторе с нелинейным сопротивлением и на дугогасительной решетке выключателя (АГП) позволяют быстро гасить поле. Однако их стоимость высока и это стимулирует поиск решений, альтернативных уже существующим [3].

Таким образом, актуален поиск решений, позволяющих создать такое УГП, которое сможет быстро гасить поле синхронных машин и будет иметь приемлемую стоимость.

Для того чтобы преодолеть недостатки устройств, реализующих вышеописанные способы можно использовать предложенный в [4] способ гашения поля. УГП, выполненное на базе этого способа, отличается от известных тем, что ВАХ контура возбуждения при гашении поля формируется путем последовательного введения в контур возбуждения специальных линейных резисторов таким образом, чтобы сопротивление контура возбуждения ступенчато возрастало (снижалась постоянная времени контура возбуждения) при снижении тока возбуждения до определенных значений. Такое формирование характеристики УГП позволяет поддерживать обратное напряжение на ОВ близким к допустимому по условиям работы ее изоляции, а также использовать типовые элементы контура возбуждения для гашения поля (резистор самосинхронизации, выключатель и

т.д.). Использование уже имеющихся элементов СВ для реализации большего количества функций приводит к снижению стоимости такого УГП.

В цепи постоянного тока контура возбуждения (рис. 1) обычно последовательно с обмоткой возбуждения (3) и возбудителем 4 включается автомат гашения поля (АГП) или выключатель 5, а параллельно с ОВ тиристорный разрядник (элементы 7 и 8) с резистором самосинхронизации 6 и контактором самосинхронизации (9), шунтирующим разрядник.

Рассмотрим схему УГП (рис. 2) по способу [4] (схема создана на базе типовой схемы СВ, рис. 1) и алгоритмы ее работы в различных режимах работы синхронного генератора.

В нормальном режиме работы генератора тиристоры УГП 8-10, стабилитроны 22-24, диод 11 и транзистор 7 находятся в запертом состоянии.

При подаче сигнала на гашение поля преобразователь 4 СВ переводится в режим инвертирования. Одновременно с подачей импульса на инвертирование подается импульс на отключение выключателя 5 и включение транзистора IGBT 7. При этом, поскольку полупроводниковые приборы обладают меньшей инерционностью, чем механические устройства, то транзистор IGBT 7 включится раньше, чем начнут размыкаться контакты выключателя 5. Таким образом, транзистор 7 шунтирует выключатель 5, что приводит к бездуговому отключению последнего.

После отключения выключателя 5 снимается импульс управления с транзистора 7, который начинает переходить в непроводящее состояние. При этом напряжение на ОВ быстро увеличивается (из-за быстрого отключения тока индуктивности), и ток ОВ 3 переходит в цепь с диодом 11 и резистором 18 по мере отключения транзистора. Как только напряжение на стабилитроне 24 достигнет величины его «срабатывания», наименьшей из всех, этот стабилитрон перейдет в проводящее состояние и в цепи управления тиристора 10 появится ток, тиристор включится и часть тока возбуждения перейдет в цепь этого тиристора (рези-

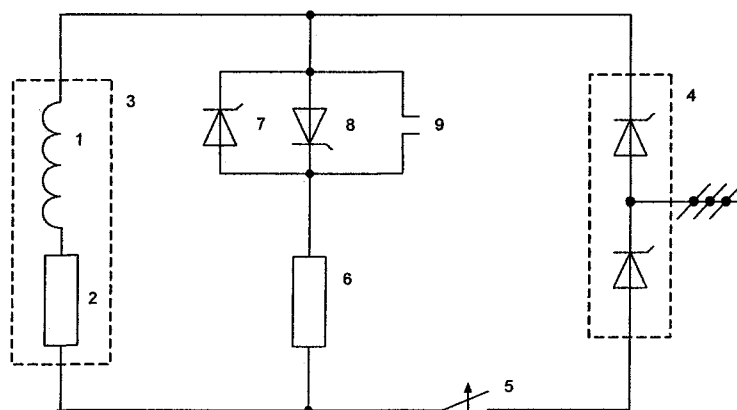


Рис. 1. Типовая схема контура возбуждения

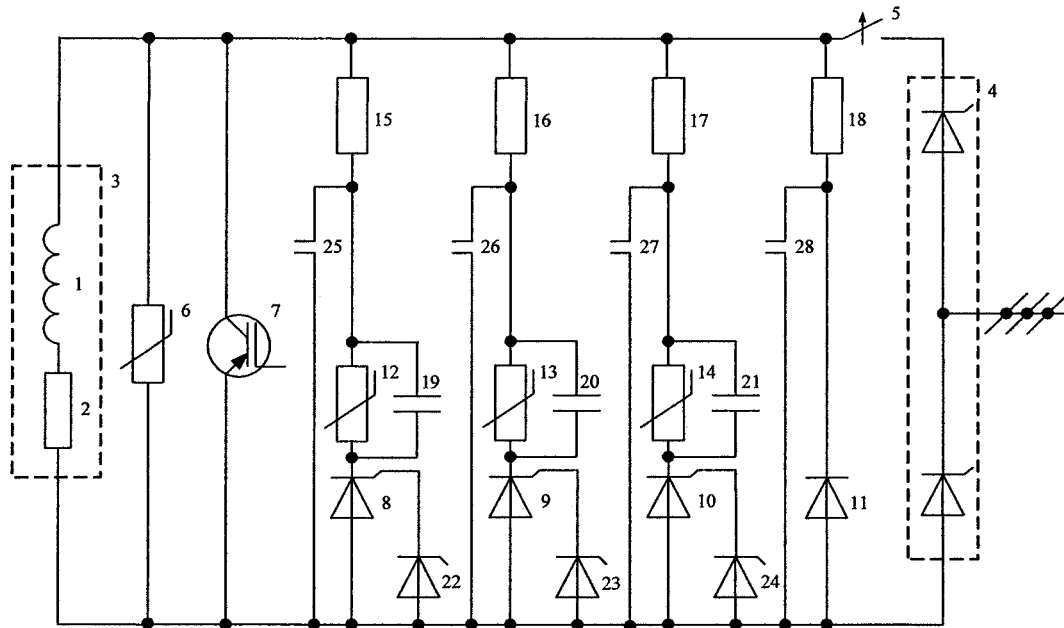


Рис. 2. Схема системы возбуждения с УГП, построенном на принципе ступенчатого увеличения сопротивления контура возбуждения

стор 17, нелинейный элемент 14, конденсатор 21). При этом конденсатор 21 начнет заряжаться до напряжения на нелинейном элементе 14.

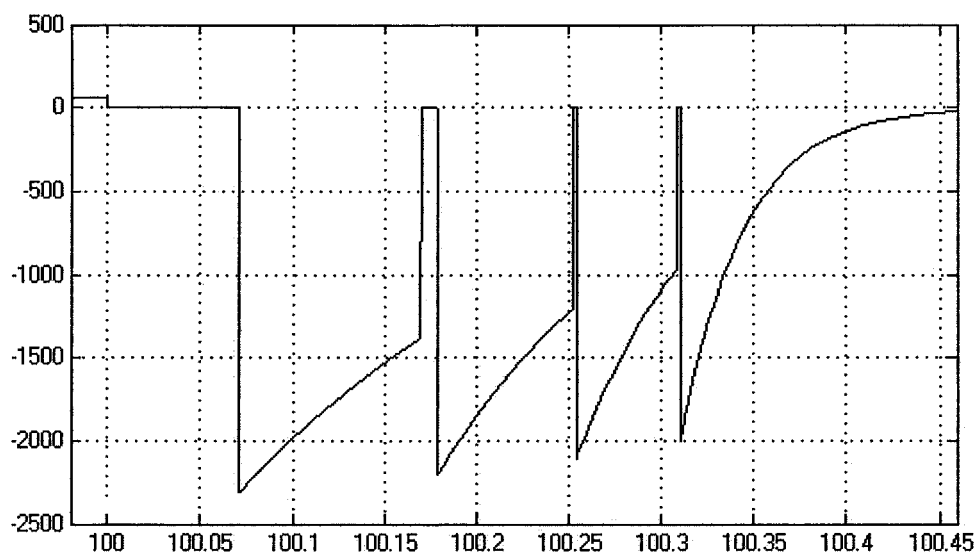
Поскольку значения сопротивлений в цепях тиристора 10 и диода 11 велики и транзистор 7 отключается быстро, то напряжение на ОВ будет продолжать увеличиваться. Когда это напряжение достигнет напряжения «срабатывания» стабилитрона 23, который, перейдя в проводящее состояние, подключит тиристор 9 аналогично тому, как стабилитрон 24 подключил тиристор 10. Тиристор 9 включится и в его цепь (резистор 16, нелинейный элемент 13 и конденсатор 20) также перейдет часть тока возбуждения. Конденсатор 20 аналогично конденсатору 21 будет заряжен до напряжения элемента 13. Напряжение на ОВ при этом также не будет ограничено и продолжит расти, пока не достигнет напряжения срабатывания стабилитрона 22, который, включившись, подаст ток управления в цепь тиристора 8. Тиристор 8 включится и подключит свою цепь (резистор 15, нелинейный элемент 12 и конденсатор 19). Часть тока возбуждения перейдет в эту цепь и напряжение на ОВ будет ограничено, поскольку теперь подключены все ступени УГП.

По мере снижения энергии магнитного поля ОВ ток возбуждения уменьшается до величины первой уставки УГП. По ее достижении транзистор 7 повторно включается и шунтирует ветви УГП. Это приводит к снижению напряжения на ОВ и ветвях УГП практически до нуля и практически полному переходу тока возбуждения в этот транзистор (сопротивления ветвей УГП велики). При снижении тока возбуждения в ветвях УГП

конденсаторы 19, 20 и 21 начинают разряжаться. Первоначально напряжение на конденсаторе велико и больше напряжения ввода в работу нелинейных элементов 12, 13 и 14. По мере разряда конденсаторов, сопротивление этих элементов существенно возрастает (на несколько порядков), и ток разряда конденсаторов начинает протекать в основном по тиристорам, которые находятся в ветвях с конденсаторами. Этот обратный ток способствует выводу из них заряда восстановления и их запираанию. После того, как тиристоры 8, 9 и 10 перешли в закрытое состояние, с транзистора 7 снимается импульс управления, он запирается, и напряжение на ОВ снова увеличивается. Однако при повторном увеличении напряжения на ОВ в работу вступают только тиристоры 9 и 10, а также диод 11, поскольку напряжение на ОВ ограничивается только тремя ступенями УГП (значительная часть энергии уже выведена из ОВ). Это приводит к увеличению напряжения на ОВ практически до уровня первого пика при гашении поля (второй пик будет несколько ниже из-за того, что напряжение «срабатывания» стабилитронов в цепях управления разное).

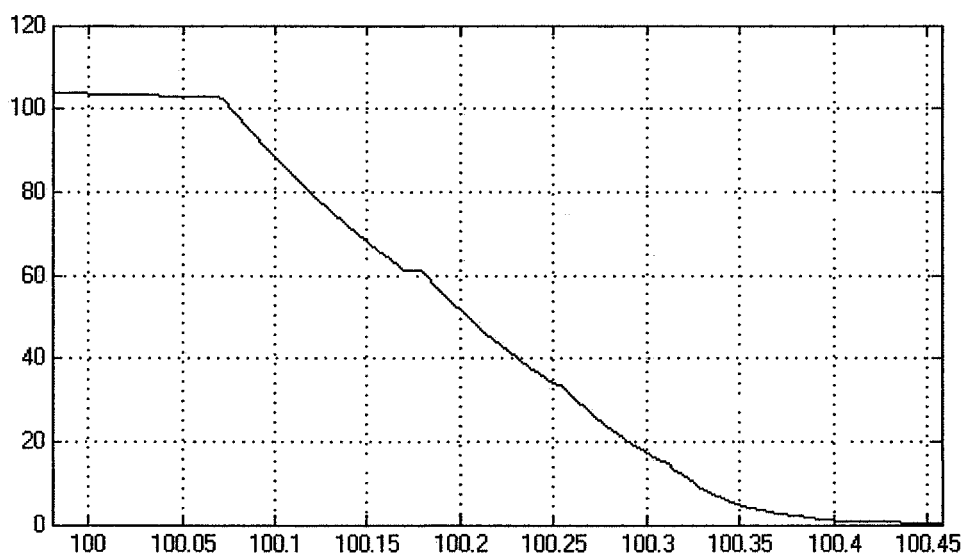
Аналогичным образом будет работать это устройство и при снижении тока ОВ до уровня следующей уставки. Гашение поля заканчивается на ветви УГП с диодом 11 и резистором 18.

Система управления тиристорами описываемого УГП построена таким образом, чтобы ввод тиристоров в работу осуществлялся за счет энергии, запасенной в контуре возбуждения и процессов, происходящих в силовой части УГП при гашении поля, а не за счет воздействия извне. Такие



Time offset: 0

Рис. 3. Напряжение на ОВ при гашении поля



Time offset: 0

Рис. 4. Ток ОВ при гашении поля

системы управления можно получить, используя в цепи управления тиристорами стабилитроны на различное напряжение «срабатывания». При этом напряжения «срабатывания» стабилитронов располагаются в следующем порядке (по мере возрастания напряжения на ОВ):

- 1) напряжение срабатывания 10;
- 2) напряжение срабатывания 9;
- 3) напряжение срабатывания 8.

Напряжение и ток ОВ при гашении поля на описываемом УТП приведены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

Литература

1. Брон, О.Б. Автоматы гашения магнитного поля / О.Б. Брон. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 138 с. (Библиотека по автоматике. Вып. 34).
2. Гольдштейн М.Е. Вентильные системы возбуждения синхронных генераторов и компенсаторов: Учебное пособие / М.Е. Гольдштейн. – 2-е изд. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 100 с.
3. Крекер Е.Я., Гольдштейн М.Е. О гашении поля генератора, оснащенного системой тиристорного возбуждения. XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспи-

рантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: сборник трудов в 3-х томах / Е.Я. Крекер, М.Е. Гольдштейн. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – Т. 1. – 547 с.

4. Патент на изобретение № 2282925. Способ и устройство гашения магнитного поля обмотки возбуждения синхронной машины (варианты) / Крекер Е.Я., Гольдштейн М.Е., Андреев А.Н. опубли. 27.08.2006, Бюл. № 24.

Поступила в редакцию 12.11.2007 г.

Крекер Евгений Яковлевич. Инженер кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского Государственного Университета, г. Челябинск. Область научных интересов – силовая электроника. E-mail: kreker_e@mail.ru.

Kreker Evgeny Jakovlevich. Engineer of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: power electronics. E-mail: kreker_e@mail.ru

Андреев Алексей Николаевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы» Южно-Уральского Государственного Университета, г. Челябинск. Область научных интересов – силовая электроника, защита преобразователей систем возбуждения синхронных генераторов. E-mail: nppessis@mail.ru

Andreev Alexey Nikolaevich. Candidate of technical sciences, associated professor of the Electrical Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: power electronics, protection of converters of excitation systems of synchronous generators. E-mail: nppessis@mail.ru.

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

*А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева,
С.Е. Мостовой, А.А. Чертоусов
г. Магнитогорск, МГТУ*

MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF POWER TRANSFORMERS WITH THE METHOD OF ACOUSTICAL DIAGNOSING

*A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, O.I. Karandaeva,
S.E. Mostovoy, A.A. Chertousov
Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University*

Дана краткая характеристика частичных разрядов (ЧР) и причин их возникновения в силовых маслонаполненных трансформаторах. Показаны характерные неисправности силовых трансформаторов 110 кВ центральной электростанции (ЦЭС) ОАО «ММК». Представлены результаты локации ЧР акустическим методом с помощью портативного прибора «АР-700». Сделан вывод о целесообразности проведения дальнейших диагностических обследований трансформаторов ЦЭС с применением стационарных приборов анализа ЧР. Целью является сбор статистической информации и создание базы данных о техническом состоянии, характере и местах возникновения дефектов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, техническое состояние, диагностирование, частичные разряды, экспериментальные исследования.

The brief performance of partial discharges (PD) and reasons of their origin in power oil-filled transformers are given. Characteristic inaccuracies of power transformers 110 kV are shown. Results of location of PD with the acoustical method with help of the portable device "AR - 700" are presented. The conclusion of expediency of further diagnostic observations of Central Electric Station transformers with application of fixed instruments of PD analysis is made.

Keywords: power transformer, technical condition, diagnosing, partial discharges, experimental researches.

В последние годы в энергетических цехах предприятий, как и в энергетике в целом, наметилась тенденция к последовательному переходу от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по действительному техническому состоянию оборудования, принятому в развитых странах. Такой переход предопределяет внедрение и развитие различных методов диагностирования состояния электрооборудования.

Одним из наиболее развивающихся диагностических методов маслонаполненного оборудования, и в первую очередь силовых трансформаторов, является метод локации и измерения уровня частичных разрядов.

Причины возникновения частичных разрядов

Частичным разрядом называется электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляционного промежутка [1]. ЧР возникают в локальных дефектах, т.е. в местах, где изоляция ослаблена из-за наличия газовых включений (полостей) или острых кромок металлических элементов изоляционных конструкций (электродов) (рис. 1) [2]. Газовые включения в жидкой или твердой изоляции – это слабые места, так как из-за различия диэлектрических проницаемостей газа и окружающих включения диэлектриков напряженность электрического поля во включениях в несколько раз выше, чем в остальной изоляции и, кроме того,

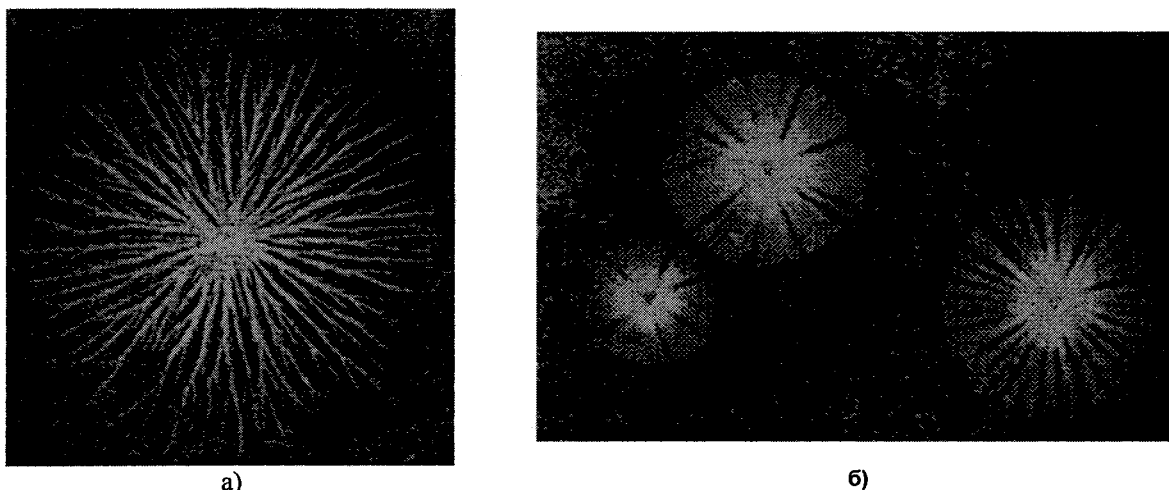


Рис. 1. Запись ЧР высокоскоростной камерой: а) поверхностный разряд с положительного электрода;
б) поверхностный разряд с отрицательного электрода

электрическая прочность газа существенно ниже, чем прочность жидких и твердых диэлектриков. ЧР могут возникать и непосредственно в масле около острых краев электродов, где напряженность электрического поля резко увеличена.

Частичные разряды в масляных прослойках, контактирующих с твердой изоляцией, как правило, приводят к повреждению твердой изоляции и образованию на ее поверхности устойчивых проводящих следов. В зоне этих следов при воздействии перенапряжений или даже рабочего напряжения могут возникать условия для непрерывного развития поверхностных разрядов, которые завершаются полным пробоем изоляции. Таким образом, ЧР представляют большую опасность для изоляции из-за быстрого ее разрушения в локальных зонах и последующего пробоя изоляционных промежутков.

Проблема образования и развития ЧР в изоляции маслонаполненного оборудования высокого и сверхвысокого напряжений в условиях его эксплуатации представляет большой практический

интерес для персонала, эксплуатирующего оборудование. В связи с этим в настоящее время на силовых трансформаторах 110 кВ центральной электростанции ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») проводятся исследования, основной технической задачей которых являются:

- оценка технического состояния маслонаполненного оборудования на основе мониторинга частичных разрядов;
- промышленное внедрение измерительного диагностического комплекса анализа ЧР и локализации зоны дефектов в изоляции трансформаторов;
- экспериментальные исследования разработанных методов диагностирования и программного обеспечения на действующем оборудовании ЦЭС.

Характерные повреждения силовых трансформаторов ЦЭС

На первом этапе проведено исследование причин и условий возникновения повреждений в силовых трансформаторах ЦЭС (табл. 1) за период с

Силовые трансформаторы ЦЭС

Таблица 1

Расположение и назначение	Станционный номер	Тип и завод изготовитель	Заводской номер	Год выпуска /срок эксплуатации (лет)
П/ст-110кВ энерго-блок	Тр-р №1	ТРДН - 40000 / 110-76У1, г. Гольяпти	9835	1978 / 28
П/ст-110кВ система	Тр-р №2	ТРДЦН - 63000 / 110-76У1, г. Гольяпти	13580	1983 / 23
П/ст-110кВ система	Тр-р №3	ТРДЦН - 63000 / 110-76У1, г. Гольяпти	11964	1981 / 25
П/ст-110кВ энерго-блок	Тр-р №4	ТДЦНГУ- 80000, г. Москва	927673	1968 / 38
П/ст-110кВ система	Тр-р №5	ТРДН - 63000 / 110 У1, г. Москва	1482839	2000 / 6
П/ст-110кВ система	Тр-р №6	ТРДН - 63000 / 110 У1, г. Москва	1573104	1998 / 8

2002 года по 2006 год. Для оценки распределения повреждений по классам напряжений использовались данные Департамента генеральной инспекции по эксплуатации электрических станций и сетей РАО «ЕЭС России» табл. 2 [3].

Из табл. 2 следует, что силовые трансформаторы 110 кВ относятся к группе, имеющей самую высокую частоту появления повреждений. Анализ их распределения по основным узлам трансформаторов показал, что наибольшую повреждаемость имеют: высоковольтные вводы – 22 %, обмотки – 16%, устройства РПН – 13,5 %. Данные распределения повреждений по основным узлам трансформаторов с учетом срока эксплуатации представлены в табл. 3 [4]. Как видно из таблицы, повреждения обмоток имеют место у трансформаторов с любыми сроками эксплуатации, для РПН наибольшее число повреждений возникает у трансформаторов со сроками эксплуатации 10–30 лет, для высоковольтных вводов – после 10 лет эксплуатации.

Наиболее тяжелым повреждением трансформатора является внутреннее короткое замыкание. Как показал анализ, при повреждениях обмоток внутренние КЗ имели место в 80 % случаев общего числа повреждений обмоток, при повреждениях высоковольтных вводов – 89 %, при повреждениях РПН – 25 % и при повреждениях прочих узлов – 36 %, включая ошибки при монтаже, ремонте и эксплуатации.

Локация частичных разрядов акустическим методом

Регистрация ЧР в высоковольтном оборудовании энергосистем в условиях эксплуатации используется для целей диагностики в течение последних 10–15 лет. Контроль состояния трансфор-

маторного оборудования по характеристикам ЧР показал, что он может быть весьма эффективным.

Известны следующие методы регистрации ЧР [5]:

- электрический метод, основанный на измерении сигналов в электрических цепях, связанных с контролируемым объектом;
- электромагнитный метод, основанный на дистанционной регистрации электромагнитного излучения ЧР в СВЧ-диапазоне;
- оптический метод, основанный на дистанционной регистрации оптического излучения ЧР;
- акустический метод, основанный на измерении акустических колебаний, образующихся при ЧР, с помощью устройств контактного или дистанционного типа.

Большие возможности обеспечивает метод локализации зон электромагнитной активности на поверхности трансформатора с использованием устанавливаемых на момент измерений датчиков и измерительных устройств [6]. Это позволяет делать надежное заключение о техническом состоянии дефектного узла, включая: изоляцию, барьеры, дугу в магнитопроводе, искрения в РПН. Подобная информация, включающая тип разрядного явления и его место, может быть отождествлена с конструкцией активной части трансформатора. Это позволяет более достоверно прогнозировать надежность трансформатора, так как заключение делается не по общим оценкам характеристик ЧР, а с учетом их конкретного месторасположения. Например, наличие даже очень интенсивных разрядов в элементах крепления магнитопровода не так важно, как довольно слабые ЧР в витковой изоляции.

Исследования ЧР в изоляции силовых трансформаторов ЦЭС осуществлялись с помощью

Таблица 2

Распределения повреждений силовых трансформаторов по классам напряжений

Классы напряжений	35 кВ	110 кВ	220 кВ	330 кВ	500 кВ	750 кВ
Распределение повреждений, %	29	47	19	2	3	0

Таблица 3

Распределения повреждений силовых трансформаторов по основным узлам с учетом срока эксплуатации

Узел	Распределения повреждений с учетом срока эксплуатации, %			
	10 лет	10–20 лет	20–30 лет	более 30 лет
Обмотка	14,7	15,9	14,7	18
Магнитопровод	3,6	0	0	0
Система охлаждения	1,2	9	8	0
РПН	7,5	18	13,5	6
Течь масла	7,8	10,2	12	6,9
Высоковольтные вводы	9,6	23,4	24	19,8

прибора типа «AR700», изготавливаемого ПВФ «ВИБРО-ЦЕНТР» (г. Пермь). Прибор применяется для регистрации и анализа акустических сигналов, а также для локации зоны дефектов в изоляции высоковольтного оборудования с возможностью записи результатов измерений в долгосрочную энергонезависимую память с последующим их просмотром и сохранением в базе данных персонального компьютера.

Прибор имеет жидкокристаллический низкотемпературный дисплей с разрешением 240×128 точек. Комплектуется четырьмя акустическими датчиками частичных разрядов и одним высокочастотным датчиком типа RFCT. Может эксплуатироваться при температуре окружающего воздуха от минус 20 до плюс 50 °С и относительной влажности воздуха до 98 % без конденсации влаги. Составляет из акустического преобразователя и измерительного устройства, соединенных между собой коаксиальным кабелем.

Экспериментальные исследования трансформаторов ЦЭС

Экспериментальные исследования выполнялись на 6 трансформаторах ЦЭС, перечень которых представлен в табл. 1. С этой целью на внешних сторонах бака трансформатора устанавливались акустические датчики прибора «AR700». Выбор места их расположения осуществлялся по следующей методике.

1. Перед началом работы к прибору подключается один акустический датчик и проводится анализ на возникновение акустических сигналов частичных разрядов. При обнаружении зоны возникновения ЧР выставляются четыре акустических датчика на расстоянии не менее 50 см друг от друга. Далее в приборе задается размер бака трансформатора, и выставляются координаты датчиков. Проводится однократная регистрация и по полученным сигналам выставляется порог для обработки.

2. Задается порог сигнала, т.е. величина, принимаемая для обработки (в процентах от максимального значения, на уровне 50% для всех трансформаторов).

3. Устанавливаются настройки шума (в расчетах зоны дефекта принимаются только сигналы выше установленного порога). Пороговые значения варьировались в зависимости от конкретного трансформатора и подбирались экспериментально.

4. Для расчета зоны дефекта все замеры производились в течение 60 секунд.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты замеров частичных разрядов, выполненных на трансформаторе №1 энергоблока ЦЭС. Точки, схематично показанные внутри объемной зоны трансформатора (рис. 2, а), наглядно характеризуют количество и месторасположение разрядов. Акустические всплески, зафиксированные в

исходных сигналах, поступающих с датчиков (рис. 2, б), характеризуют амплитуду, частоту и длительность ЧР.

В результате эксперимента при относительно высоких порогах шумов (0,45 В) зафиксировано значительное количество разрядов, распределенных практически по всему объему бака. Обслуживающему персоналу рекомендовано провести дополнительные диагностические обследования технического состояния на предмет развития дефектов.

Аналогичные эксперименты выполнены на остальных пяти трансформаторах, представленных в табл. 1. Подтверждена прямая взаимосвязь частоты возникновения ЧР и длительности эксплуатации трансформатора после капитального ремонта. Накопление информации и обработка сигналов позволяют определить количественные характеристики ЧР, перечень которых представлен в [1]. С этой целью даны рекомендации по приобретению и установке на трансформаторах №1–№4 (с наиболее продолжительными сроками эксплуатации) стационарных приборов с целью постоянного контроля за развитием ЧР. Для остальных трансформаторов рекомендовано проведение периодических замеров с частотой не реже одного раза в месяц.

Технико-экономический эффект от проведенных работ заключается в предотвращении аварий силовых трансформаторов за счет повышения эффективности обнаружения неисправностей на ранней стадии их развития.

Выводы

1. Результаты локации частичных разрядов в трансформаторах ЦЭС подтвердили основные достоинства акустического метода:

– оперативность – измерение, контроль и последующий анализ результатов проводятся без снятия силового напряжения;

– высокую эффективность диагностирования нарушений технического состояния трансформатора и локализации участков возникновения повреждений.

2. Целесообразно внедрение в эксплуатацию аппаратно-программного комплекса «АР-700», реализующего акустический метод регистрации ЧР и обеспечивающего оперативный контроль и диагностирование технического состояния силовых трансформаторов.

3. Целесообразно проведение дальнейших диагностических обследований трансформаторов ЦЭС с применением стационарных приборов анализа частичных разрядов и локации зоны дефектов в изоляции. Целью таких исследований является сбор статистической информации и создание базы данных о техническом состоянии, характере неисправностей и местах возникновения дефектов.

Трансформатор № 1

Размеры бака:

X=550 см;

Y=500 см;

Z=200 см.

Координаты датчиков (см):

Канал	X	Y	Z
1 (7)	550	50	130
2 (8)	550	50	180
3 (9)	550	100	180
4 (10)	550	100	130

Порог сигнала: 50%

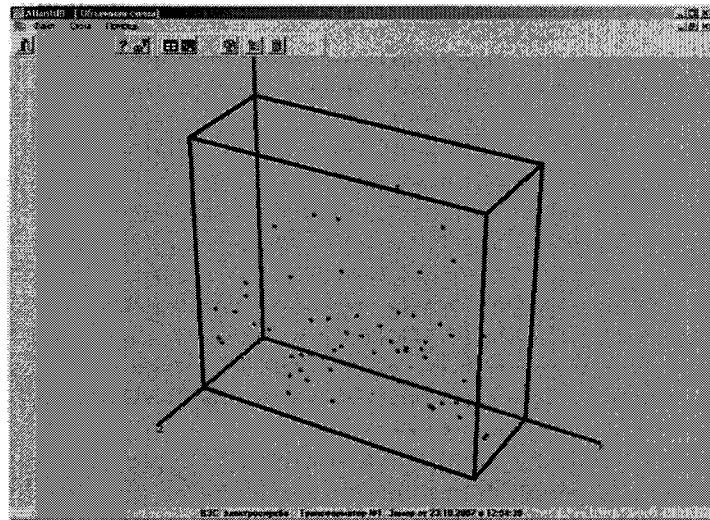
Настройки шума:

Канал 1: 0,45 В;

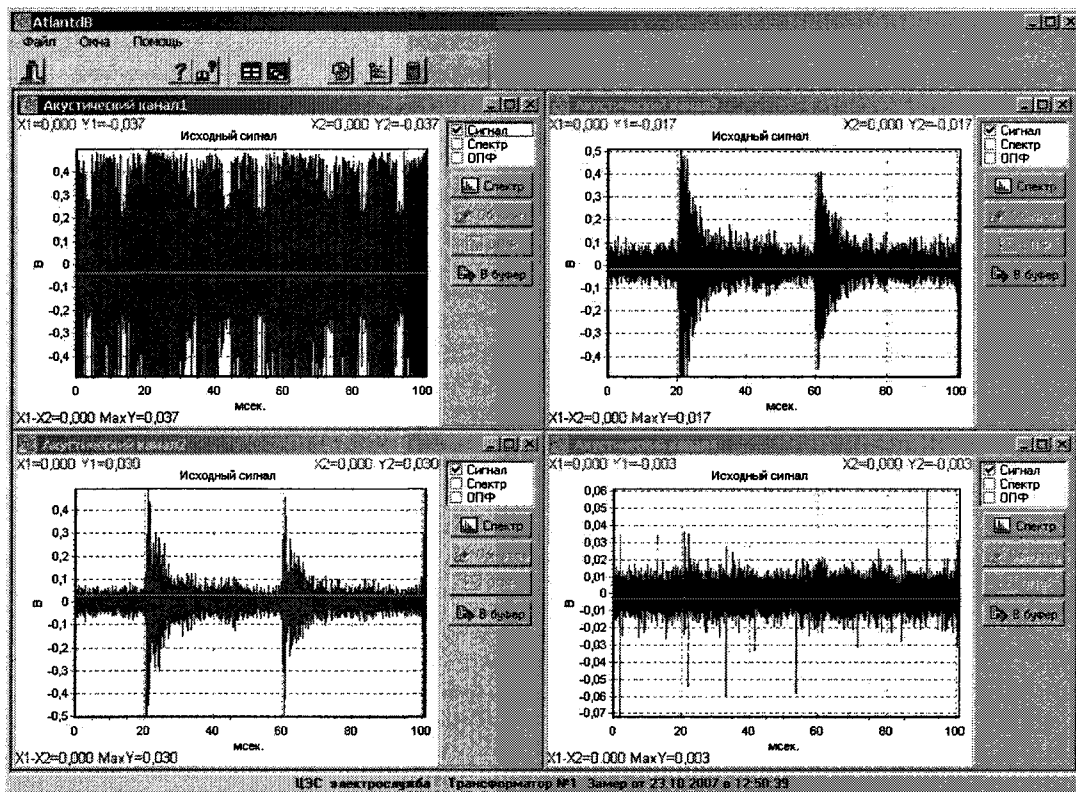
Канал 2: 0,45 В;

Канал 3: 0,45 В;

Канал 4: 0,05 В.



а)



б)

Рис. 2. Результаты мониторинга частичных разрядов трансформатора № 1:
а) объемная схема бака; б) осциллограммы акустических сигналов

Литература

1. *International Standard «High-voltage test techniques – Partial discharge measurements» – IEC 60270, Third edition, 2000-12.*

2. *Применение технологии ЧР в диагностике изоляции / Claude Kane, Alexander Golubev. – http://www.partial-discharge.com*

3. *О повреждении силовых трансформаторов / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.*

4. *Львов, М.Ю. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов*

электрических сетей / М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов, Ю.А. Дементьев // Электрические станции. – 2005. – № 11. – С. 69–75.

5. *Электрооборудование и электроустановки. Методы измерения характеристик частичных разрядов. – ГОСТ 20074-83.*

6. *Аксенов, Ю.П. Использование усовершенствованных методов электромагнитной локализации разрядных явлений для определения объема ремонта трансформаторов / Ю.П. Аксенов, В.И. Завидей, И.В. Ярошенко // Электро. – 2004. – №5. – С. 19–24.*

Поступила в редакцию 11.01.2008 г.

Карандаев Александр Сергеевич. Доктор техн. наук, профессор, декан энергетического факультета, заведующий кафедрой электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет» (ГОУ ВПО «МГТУ»).

Karandaev Alexander Sergeevich. Doctor of technical sciences, professor, head of Electrical Engineers and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: automatic electric drive, reliability of electric equipment.

Евдокимов Сергей Алексеевич. Кандидат техн. наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «МГТУ».

Evdokimov Sergey Alexeevich. Candidate of technical science, associate professor of Electronics and Microelectronics department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: reliability, diagnostic of technical conditions of electrotechnical and energy equipment.

Карандаева Ольга Ивановна. Доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «МГТУ».

Karandaeva Olga Ivanovna. Associate professor of Electrical Engineers and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: reliability of electric equipment.

Мостовой Сергей Евгеньевич. Аспирант кафедры электротехники и электротехнических систем, ГОУ ВПО «МГТУ».

Mostovoy Sergey Evgenievich. Post-graduate student of Electrical Engineers and Electrotechnical Systems department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: reliability of electric equipment.

Чертоусов Антон Александрович. Кандидат техн. наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «МГТУ».

Chertousov Anton Alexandrovich. Candidate of technical science, associate professor of Electronics and Microelectronics department of Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Scientific interests: automatic electric drive, control systems.

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

И.М. Кирпичникова*, Е.В. Соломин**

*г. Челябинск, ЮУрГУ, **г. Миасс, ГРЦ «Вертикаль»

VERTICAL AXIS WIND TURBINE

I.M. Kirpichnikova, E.V. Solomin

Chelyabinsk, SUSU, Miass, "SRC-Vertical", Ltd.

В статье дается описание ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения, особенности ее конструкции, методика расчета мощности. Представлены основные технические характеристики ВЭУ и схема ее подключения.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, ветроэнергетические установки, ветроколесо, ветрогенератор, электрогенератор, мощность ветроустановки

The article describes the vertical axis wind turbine, features of its design, power calculation procedure. The main technical parameters and connection diagram are represented.

Keywords: renewable energy, wind turbine, wind wheel, wind rotor, electric alternator, wind turbine power.

Интерес человечества к использованию возобновляемой, или «зеленой» энергии в последнее время стал проявляться все более заметно. Разрабатываются новые установки, использующие принципы преобразования природной энергии в тепловую, электрическую и т.д., которые не наносят ущерб окружающей среде.

Одним из видов таких устройств являются ветроэнергетические установки (ВЭУ), использующие энергию ветра. Ветер является источником, существующем в окружающем пространстве независимо от желания человека и его деятельности.

На сегодняшний день имеется огромное многообразие машин, механизмов и установок, которые «ловят» ветер и превращают его в полезную электроэнергию. Самые распространенные из них – ветротурбины с горизонтальной осью вращения (рис. 1). Однако у этих машин есть один существенный недостаток – они долго «думают», прежде чем развернуть свои лопасти «на ветер», направление которого может измениться каждую секунду.

В зависимости от направления ветра меняется площадь, ометаемая ветроколесом, которая является основой для расчета выходной мощности ветроэнергетической установки [1]:

$$P_{ВЭУ} = 0,4D^2v^3\xi\rho\eta_{мех}\eta_{ген}, Вт \quad (1)$$

где D – диаметр ветроколеса, м; v – скорость ветра, м/с; ξ – коэффициент использования ветровой

энергии; ρ – $0,125 \text{ кг с}^2/\text{м}^4$ – плотность воздуха; $\eta_{мех}$ – к.п.д. редуктора; $\eta_{ген}$ – к.п.д. генератора.

Обычно в технических характеристиках установок с горизонтальной осью вращения площадь, ометаемая ветроколесом, принимается равной площади, охватываемой лопастями ветроустановки. Однако из рис. 2 видно, что ометаемая площадь зависит от направления ветра по отношению к оси ротора и в некоторые моменты может быть значительно меньше площади ветроколеса. Следовательно, мощность, вырабатываемая ветроустановкой, также будет непостоянной.



Рис. 1. ВЭУ с горизонтальной осью вращения

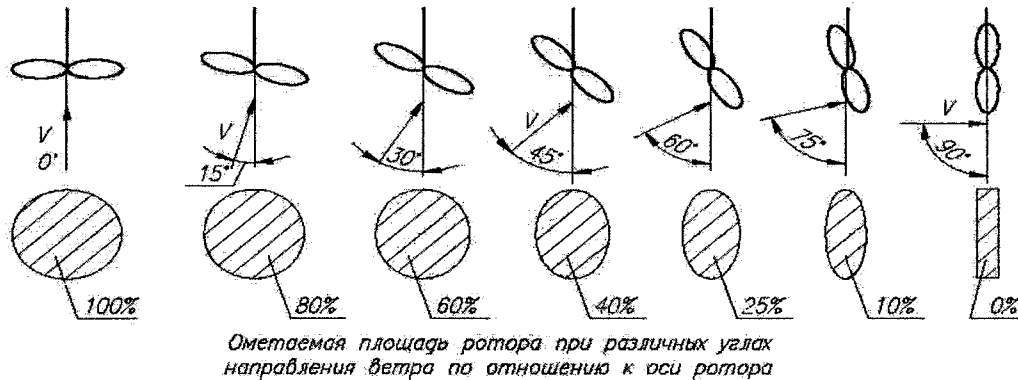


Рис. 2. Площадь, ометаемая ветроколесом

Это не относится к установкам с вертикальной осью вращения, хотя и они имеют свои преимущества и недостатки.

На рис. 3 показана схема работы установки с вертикальной осью вращения, разработанной в ООО «ГРЦ-Вертикаль» [2].

При наличии ветра ветроустановка, состоящий из лопастей, закрепленных между кольцами, вращается и приводит в движение генератор, который с помощью электронного регулятора вырабатывает постоянный электрический ток с напряжением 48 В. Далее постоянный ток с помощью инвертора преобразуется в переменный ток с напряжением 220 В и поступает непосредственно потребителю. Аккумуляторные батареи включены параллельно с кабелем выхода генератора и подпитывают инвертор в случае отсутствия ветра. Выход инвертора подключается к клеммам, от которых должна идти внутренняя разводка по помещению потребителя.

ВЭУ стартует (самораскручивается) при по-

рывах ветра 3,5 м/с (в это время анемометр может показать более низкую скорость ветра). Выработка энергии начинается при скорости ветра 4 м/с.

ООО «ГРЦ-Вертикаль» разрабатывает ветроэнергетические установки (ВЭУ) с 1991 года на базе ФГУП «Государственного Ракетного Центра» (КБ им. Академика В.П.Макеева), г. Миасс Челябинской области и ФГУП «Кумертауского Авиационного Предприятия», г. Кумертау. За это время были исследованы различные конструкции ВЭУ.

С 2004 года разработки ООО «ГРЦ-Вертикаль» в области ветроэнергетики, создания ветро-водородных комплексов, установок по очистке воды и многое другое финансируются Национальной Лабораторией Беркли (США) под патронажем Департамента Энергетики США, Международных фондов, Правительства РФ и Российского Ракетно-Космического Агентства.

В результате совместной работы российских и американских ученых была предложена оптималь-

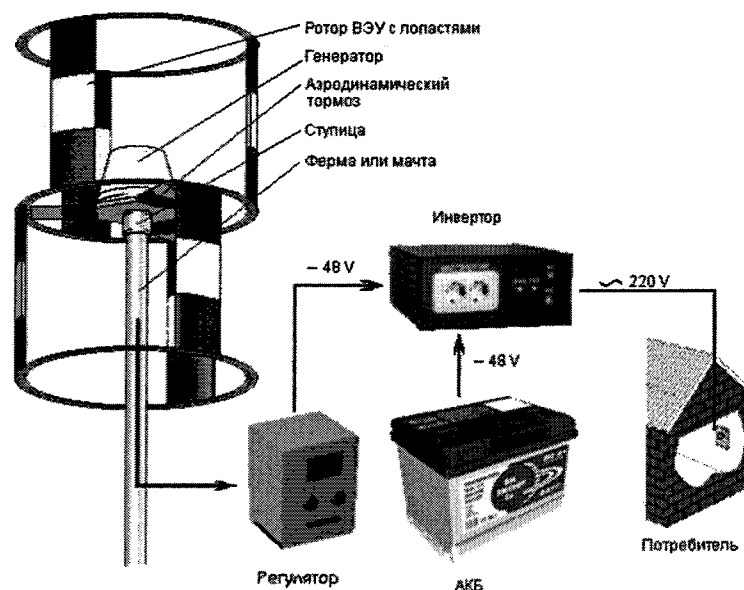


Рис. 3. Схема работы ветроустановки конструкции ООО «ГРЦ-Вертикаль»

ная форма лопасти по соотношению хорды и ширины лопасти, которая запатентована в России и США [3, 4].

Скорость вращения ВЭУ по достижении 180 оборотов в секунду при дальнейшем усилении ветра стабилизируется за счет аэродинамических тормозов (рис. 4). Благодаря этому ВЭУ не идет «вразнос».

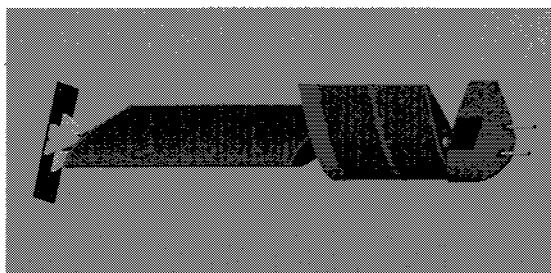


Рис. 4. Аэродинамические тормоза

Для работы в условиях низких температур, например в районах Крайнего Севера, лопасти ВЭУ комплектуются специальной углепластиковой пленкой, предотвращающей обледенение поверхности лопастей.

Оригинальной научно-технической разработкой является запатентованный ветроротор (ветроколесо) ветроэнергетической установки. К его достоинствам можно отнести самораскрутку при скорости ветра 3,5 м/с, плавную работу за счет смещения верхних лопастей относительно нижних

на 60°, оптимальный угол атаки лопастей. Одним из основных достоинств ротора считается то, что данная конструкция «ловит» порывы ветра. Т.е. при замерах анемометра скорость ветра может составить 3 м/с, а ротор ВЭУ будет крутиться как при скорости 6 м/с. Оригинальная форма ротора в совокупности с оптимальным профилем лопастей дают КПД до 43 % при любом направлении ветра.

К уникальным разработкам можно отнести две принципиально новые конструкции генераторов:

1. С аксиальным зазором, разработанную совместно с Empire Magnetics, Inc. [5, 6].

2. С комбинированным возбуждением, где стабилизация напряжения на клеммах генератора при изменении нагрузки и частоты вращения осуществляется с помощью изменения тока возбуждения генератора [7].

Ступица содержит специально сконструированную систему подшипников, позволяющую предельно уменьшить потери от момента сопротивления.

В качестве аккумуляторов для ВЭУ производства ООО «ГРЦ-Вертикаль» используются обычные автомобильные аккумуляторы (12 В). Инвертор также может использоваться стандартный или специального исполнения.

В виде инвертора может быть использован практически любой прибор, преобразующий постоянный ток с напряжением 48 В в переменный ток с напряжением 220 В. Схема подключения ветроустановки показана на рис. 5.

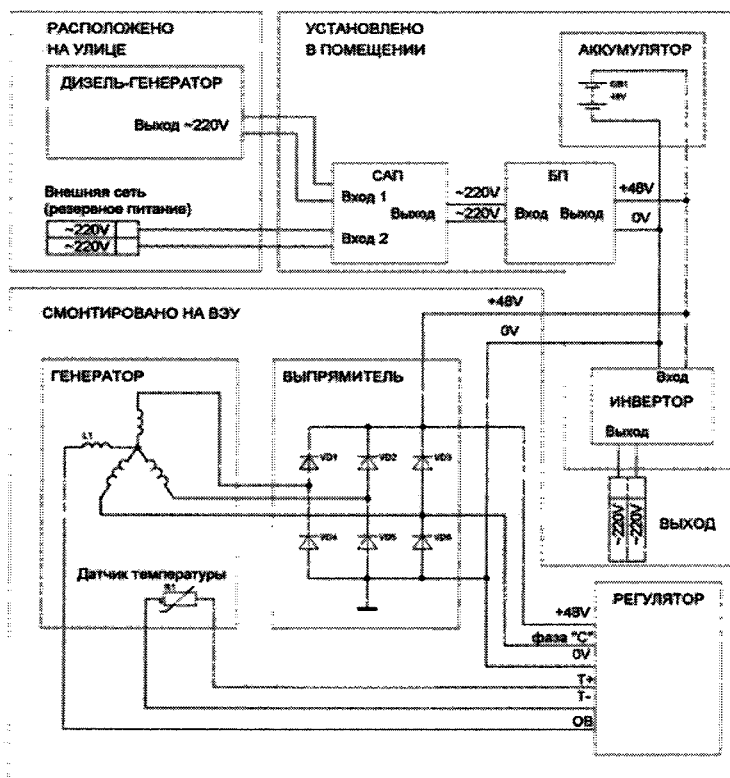


Рис. 5. Схема подключения ВЭУ мощностью 3 кВт: ВЭУ – ветроэнергетическая установка; САП – система автоматического пуска дизель-генератора; БП – блок питания (преобразователь напряжения ~220 В +48 В)

Техническая характеристика ВЭУ
мощностью 3 кВт

Мощность генератора номинальная	3 кВт
Выходное напряжение генератора постоянного тока	48 В
Рабочий диапазон скоростей ветра	4...30 м/с
Номинальная скорость ветра	10,4 м/с
Диаметр ротора	3,4 м
Высота ротора	4,2 м
Число лопастей (стеклопластик)	6 шт.
Частота вращения ротора	60...180 об/мин
Высота мачты	8, 12, 16 или 20 м
Расчетная скорость бурового ветра	до 60 м/с
Диапазон температур эксплуатации	-50...+50 °С
Срок службы силовых узлов	20 лет
Срок между капитальными ремонтами	5 лет
Масса ВЭУ	620 кг

Мощность, вырабатываемая такой ветроустановкой, определяется [2]:

$$P_{ВЭУ} = P_{\sigma} \eta_{мех} \eta_{ген} \eta_{инв}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где $P_{\sigma} = \frac{m \cdot v^3}{2}$ – мощность, получаемая от ветра за 1 с, Вт; $m = v \rho_{\sigma} S$ – масса воздуха, проходящая через ометаемую площадь за 1 с, м³; $\rho = 0,125 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ – плотность воздуха; v – скорость ветра, м/с; $\eta_{мех}$ – к.п.д. ветроустановки; $\eta_{ген}$ – к.п.д. генератора; $\eta_{инв}$ – к.п.д. инвертора.

Для 3-киловаттной ВЭУ при размере ометаемой площади 24 м² и номинальной скорости ветра 10,4 м/с реальный выход электрической мощности ветроустановки составит 3305 Вт.

Таким образом, непрерывно работающая ветроустановка может питать все бытовые приборы, подключенные в коттедже, офисе (освещение, телевизор, холодильник, сигнализацию, и т.д.) заряжать аккумуляторы, которые можно использовать во время пиковых нагрузок, например, утром и вечером, когда мощности ветроэнергетической установки может быть недостаточно, тем более, при отсутствии ветра.

Литература

1. Безруких П.П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. – Колос, 2008. – 196 с.
2. www.src-vertical.com
3. Патент № 2244996 (Российская Федерация). Генератор переменного тока / С.А. Ганджа, Е.В. Соломин, А.Д. Шауфлер // Бюл. изобр. – 2005. – № 2.
4. Патент № PCT/US2006/019326 (WO2006/125118) (Соединенные Штаты Америки) Ветроустановки с вертикальной осью вращения / Vertical axis wind turbines / Dahlbacka Glenn (USA), Halstead Richard (USA), Krivcov, Vladimir (RU), Krivospitsky Vladimir (RU), Maksimov Vasili (RU) // Бюл. изобр. – F03B 13/00 (2006.01).
5. www.wind-sail.com
6. www.empiremagnetics.com
7. www.nii-uralmet.narod.ru/comb-rus/index.htm

Поступила в редакцию 10.01.2008 г.

Кирпичникова Ирина Михайловна в 1979 году окончила Челябинский институт механизации и электрификации сельского хозяйства (ныне Челябинский государственный агроинженерный университет), в 2001 году защитила докторскую диссертацию, профессор. С 2007 года работает заведующей кафедрой электротехники Южно-Уральского государственного университета. Научные интересы – электронно-ионная технология, использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Kirpichnikova Irina Mikhajlovna in 1979 has ended the Chelyabinsk institute of mechanization and electrification of an agriculture, in 2001 has protected the thesis for a doctor's degree, the professor. Since 2007 works as managing faculty electrical engineers of the South-Ural state university. Scientific interests: electro-ionic technology, use of nonconventional renewed energy sources.

Соломин Евгений Викторович, генеральный директор ООО «ГРЦ «Вертикаль», в 1990 году окончил Будапештский технический университет, Венгрия, по специальности «Робототехника» Область научных интересов – ветроэнергетика.

Solomin Evgenie Viktorovich, the general director of Open Company "GRC- Vertical", in 1990 has ended the Budapest technical university, Hungary, on a speciality "A robotics". Area of scientific interests – windenergie.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ВНЕШНИХ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

М.Е. Гольдштейн, К.Е. Горшков
г. Челябинск, ЮУрГУ

ANALYSIS OF SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION SYSTEM OPERATION AT VARIOUS KINDS OF NON-SYMMETRICAL EXTERNAL SHORT CIRCUITS

M.E. Goldstein, K.E. Gorshkov
Chelyabinsk, SUSU

Рассмотрена работа системы самовозбуждения синхронного генератора, выполненной с одноканальной и многоканальной СУТ с различными способами синхронизации, при внешних несимметричных коротких замыканиях. Показаны достоинства и недостатки различных способов управления. Представлены выражения для расчета напряжения возбуждения, кратности форсировки генератора по напряжению, длительностей работы тиристоров.

Ключевые слова: короткое замыкание, КЗ, система возбуждения генератора, система управления тиристорами, многоканальная СУТ, одноканальная СУТ, синхронизация.

The synchronous generator excitation system with single- and multi-channel rectifier control systems at various kinds of non-symmetrical external short circuits is described. The rectifier control systems synchronized relative to line or phase voltages. The advantages and disadvantages of the synchronization methods are reviewed. For analysis generator operation, the mathematical expressions for the excitation voltage, field-forcing ratio and operating ranges are calculated.

Keywords: short circuits, generator excitation system, thyristor control system, multi-channel thyristor control system, single-channel thyristor control system, synchronization.

В соответствии с требованиями ГОСТ 21558-2000 системы самовозбуждения (ССВ) турбогенераторов должны обеспечивать правильную работу синхронных машин, как в нормальном режиме, так и при возникновении аварий, в частности, коротких замыканий (КЗ), в электроэнергетических системах [1]. В отличие от систем независимого возбуждения в ССВ величина напряжения и тока ротора зависят от величины напряжения на выводах статорной обмотки синхронной машины, в связи с чем реальная кратность форсировки по напряжению турбогенератора при внешних КЗ непосредственно связана с видом и удаленностью короткого замыкания [2].

На рис. 1 представлена схема синхронного генератора (СГ) с тиристорной системой самовозбуждения (СТС). В основу СТС положен трехфазный мостовой преобразователь с одноканальной или многоканальной синхронной системой фазового управления тиристорами (ОСУТ, МСУТ).

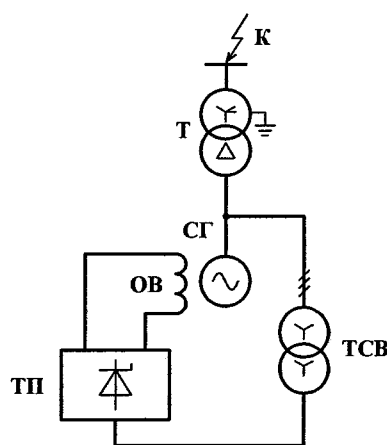


Рис. 1. Синхронный генератор с СТС (СГ – синхронный генератор, Т – повышающий трансформатор, ТСВ – трансформатор системы возбуждения, ТП – тиристорный преобразователь, ОВ – обмотка возбуждения)

Отличительной особенностью синхронной СУТ является отсчет подачи импульса управления от определенной точки напряжения сети, питающей выпрямитель [3]. Существует несколько способов реализации работы СУТ – синхронизации по фазным или линейным напряжениям. В первом случае отсчет углов управления происходит от момента перехода через нуль фазного напряжения сети, во втором случае – линейного.

Короткое замыкание во внешней сети приводит к снижению напряжения на выводах генератора, в связи с чем для поддержания напряжения преобразователь переводится в режим с нулевым углом управления – режим форсировки. При форсировке напряжение обмотки возбуждения (ОВ) определяется величинами и углами сдвига фаз напряжений, питающих преобразователь. Поэтому реальная кратность форсировки будет зависеть как от вида СУТ, так и от способа синхронизации.

Ряд вопросов работы СТС при внешних несимметричных КЗ затронут в работе [4], в частности, рассмотрена работа МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям сети на мощных синхронных генераторах. Широкое применение МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям обусловлено высоким быстродействием и правильной работой тиристоров при несимметричных КЗ. Однако такой вариант не лишен и ряда недостатков.

Анализ величин и фаз питающих напряжений тиристорного преобразователя СТС. При внешнем несимметричном КЗ величины и фазы остаточных напряжений на выводах СГ зависят от вида КЗ и расстояния до точки короткого замыкания.

На рис. 2 изображены расчетные схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей для начального момента времени при разных видах внешних КЗ $K^{(n)}$. Синхронный генератор представлен сверхпереходными значениями ЭДС E_ϕ^n и индуктивного сопротивления по продольной

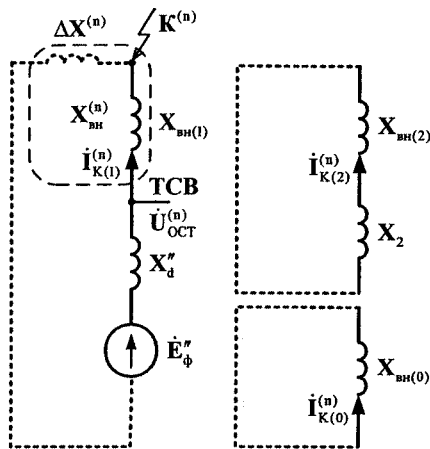


Рис. 2. Схемы замещения прямой (1), обратной (2) и нулевой (0) последовательностей при внешнем несимметричном КЗ

оси x_d^n , а также сопротивлением обратной последовательности x_2 . Индуктивные сопротивления трансформатора и элементов внешней сети заменены эквивалентными сопротивлениями $x_{вн(1)}$, $x_{вн(2)}$, $x_{вн(0)}$. Схема и группа соединения обмоток повышающего трансформатора $Yn/D-11$.

Обозначим сумму внешнего эквивалентного сопротивления прямой последовательности и дополнительного сопротивления в точке КЗ как $x_{вн}^{(n)}$. Пренебрегая активными сопротивлениями элементов, остаточные напряжения на выводах СГ можно рассчитать по выражениям:

$$\begin{cases} |\dot{U}_A| = \frac{k \cdot x_2 + x_{вн}^{(n)}}{x_d^n + x_{вн}^{(n)}} \cdot |\dot{E}_\phi^n|; \\ |\dot{U}_B| = |\dot{U}_C| = \frac{\sqrt{(x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2)^2 + x_{вн}^{(n)} \cdot k \cdot x_2}}{x_d^n + x_{вн}^{(n)}} \cdot |\dot{E}_\phi^n|, \end{cases} \quad (1)$$

где $k = \begin{cases} 0, & \text{для } K^{(3)}, \\ 1, & \text{для } K^{(1)}, \\ -1, & \text{для } K^{(2)} \text{ и } K^{(1,1)}. \end{cases}$

$$\begin{cases} \varphi_A = -\frac{\pi}{2}; \\ \varphi_B = \pi - \arctg \left| \frac{x_{вн}^{(n)} + k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2)} \right|; \\ \varphi_C = \arctg \left| \frac{x_{вн}^{(n)} + k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2)} \right|. \end{cases} \quad (2)$$

Выражения справедливы для внешнего двухфазного КЗ между фазами «А» и «В» и однофазного КЗ фазы «С». Для расчета величин при других видах КЗ достаточно изменить индексы в записи напряжений в соответствии с комбинацией замкнутых фаз.

В табл. 1 представлены величины остаточных напряжений для турбогенератора ТГВ-200-2М в начальный момент времени при разных видах внешних КЗ за повышающим трансформатором ($E_T = 1,14$ о.е., $x_d^n = 0,224$ Ом, $x_2 = 0,273$ Ом, $x_T = 0,112$ Ом, $x_{T0} = 0,85 \cdot x_T$). По данным таблицы построена векторная диаграмма (рис. 3).

Таблица 1
Остаточное напряжение на выводах генератора ТГВ-200-2М в момент КЗ за трансформатором

Вид	Напряжение, о.е.		Фаза, эл. град		
	U_A	U_B, U_C	φ_A	φ_B	φ_C
$K^{(3)}$	0,380	0,380	-90	150	30
$K^{(2)}$	0,354	1,069		170,5	9,5
$K^{(1,1)}$	0,234	1,111		173,9	6,1
$K^{(1)}$	1,208	0,717		122,6	57,4

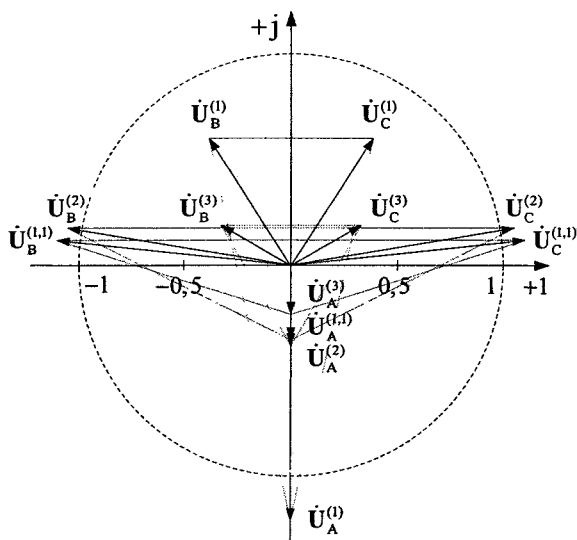


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений на выводах генератора ТГВ-200-2М в момент КЗ за трансформатором

Вспользуемся формулами (1) и (2) и запишем выражения для расчета величин и фаз линейных питающих напряжений тиристорного преобразователя в именованных единицах.

$$\begin{cases} |\dot{U}_{BC}| = \frac{\sqrt{3}(x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2)}{K_{ТСВ} \cdot (x_d^{(n)} + x_{вн}^{(n)})} \cdot |\dot{E}_\phi^{(n)}|, \\ |\dot{U}_{AB}| = |\dot{U}_{CA}| = \\ = \frac{\sqrt{3}\sqrt{(x_{вн}^{(n)} + k \cdot x_2)^2 - x_{вн}^{(n)} \cdot k \cdot x_2}}{K_{ТСВ} \cdot (x_d^{(n)} + x_{вн}^{(n)})} \cdot |\dot{E}_\phi^{(n)}|, \end{cases} \quad (3)$$

где $k = \begin{cases} 0, & \text{для } K^{(3)}, \\ 1, & \text{для } K^{(1)}, \\ -1, & \text{для } K^{(2)} \text{ и } K^{(1,1)}. \end{cases}$

$$\begin{cases} \varphi_{BC} = \pi, \\ \varphi_{CA} = +\arctg \left| \frac{\sqrt{3}(x_{вн}^{(n)} + k \cdot x_2)}{x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2} \right|, \\ \varphi_{AB} = -\arctg \left| \frac{\sqrt{3}(x_{вн}^{(n)} + k \cdot x_2)}{x_{вн}^{(n)} - k \cdot x_2} \right|. \end{cases} \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) справедливы как для начального, так и для квазиустановившегося интервалов форсировки генератора. Во втором случае, вместо значения сверхпереходной ЭДС следует подставить значение в квазиустановившемся режиме, а сверхпереходное сопротивление генератора заменить синхронным сопротивлением по продольной оси.

Оценка величины напряжения обмотки возбуждения при внешнем КЗ. Величина вы-

прямленного напряжения в момент КЗ зависит как от величин и фаз линейных напряжений, питающих тиристорный преобразователь, так и от способа синхронизации СУТ.

Для ССВ с многоканальной СУТ, синхронизированной по линейным напряжениям сети, при работе с нулевым углом управления момент подачи управляющего импульса на тиристор совпадает с моментом прикладывания к нему положительного напряжения независимо от вида КЗ. В ССВ с МСУТ с синхронизацией по фазным напряжениям и ОСУТ возможно запаздывание или преждевременное появление управляющих импульсов в зависимости от вида и величины несимметрии питающих напряжений. Запаздывание импульсов управления приводит к изменению величины выпрямленного напряжения и перераспределению длительностей работы тиристоров. Преждевременная подача управляющего импульса не оказывает влияния на распределение длительностей работы тиристоров, так как коммутация тиристора начинается при появлении на нем положительного напряжения.

Обозначим интервалы запаздывания управляющих импульсов как $\epsilon_{1,4}$, $\epsilon_{2,5}$ и $\epsilon_{3,6}$ в соответствии с порядковыми номерами тиристоров. В этом случае среднее значение за период выпрямленного напряжения преобразователя без учета длительностей коммутации тиристоров можно записать в виде суммы трех интегралов

$$\begin{aligned} U_{d0} = & \frac{1}{\pi \cdot K_{ТСВ}} \left[\int_{\frac{\pi}{2} + \epsilon_2}^{-\alpha_1 + \epsilon_3} |\dot{U}_{CAm}| \cdot \cos(\omega t + \varphi_{CA}) dt + \right. \\ & + \int_{-\alpha_1 + \epsilon_3}^{\alpha_1 + \epsilon_1} |\dot{U}_{CBm}| \cdot \cos(\omega t) dt + \\ & \left. + \int_{\alpha_1 + \epsilon_1}^{\frac{\pi}{2} + \epsilon_2} |\dot{U}_{ABm}| \cdot \cos(\omega t + \varphi_{AB}) dt \right], \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} U_{d0} = & \frac{\sqrt{2}}{\pi \cdot K_{ТСВ}} (|\dot{U}_{AB}| \cos(\epsilon_{1,4}) + \\ & + |\dot{U}_{BC}| \cos(\epsilon_{2,5}) + |\dot{U}_{CA}| \cos(\epsilon_{3,6})). \end{aligned} \quad (5)$$

Расчетные выражения для интервалов запаздывания включения тиристоров при различных видах внешних КЗ сведены в табл. 2.

Если рассчитываемый интервал имеет отрицательный знак, то он является интервалом преждевременной подачи импульса управления. В таком случае в выражение (5) следует подставлять нулевое значение.

На рис. 4 изображены графики напряжений анодной, катодной групп тиристоров и выпрямленного напряжения для СТС турбогенератора ТГВ-200-2М с различными способами управления при двухфазном, двухфазном на землю и однофазном КЗ

за повышающим трансформатором. Кривые построены в относительных единицах для начального этапа форсировки при нулевом угле управления

и без учета длительностей коммутации тиристоров. Значения приведены к фазному номинальному напряжению обмотки НН трансформатора ССВ,

Таблица 2

Интервалы запаздывания включения тиристоров при внешнем несимметричном КЗ

Интервал, рад	Способ управления							
	МСУТ		ОСУТ					
	U _Ф	U _Л	U _A	U _B	U _C	U _{AB}	U _{BC}	U _{CA}
ε _{1,4}	$\frac{\pi}{6} - A$	0	$\frac{\pi}{6} - A$	B - A	$\frac{\pi}{3} - A - B$	$2(\frac{\pi}{6} - A)$	$\frac{\pi}{6} - A$	0
ε _{2,5}	$\frac{\pi}{6} - B$		0	$B - \frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6} - B$	$\frac{\pi}{6} - A$	0	$A - \frac{\pi}{6}$
ε _{3,6}	$A + B - \frac{\pi}{3}$		$A - \frac{\pi}{6}$	$A + B - \frac{\pi}{3}$	A - B	0	$A - \frac{\pi}{6}$	$2(A - \frac{\pi}{6})$

Примечание. $A = \arctg \frac{x_{BH}^{(n)} - k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{BH}^{(n)} + k \cdot x_2)}$, $B = \arctg \frac{x_{BH}^{(n)} + k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{BH}^{(n)} - k \cdot x_2)}$.

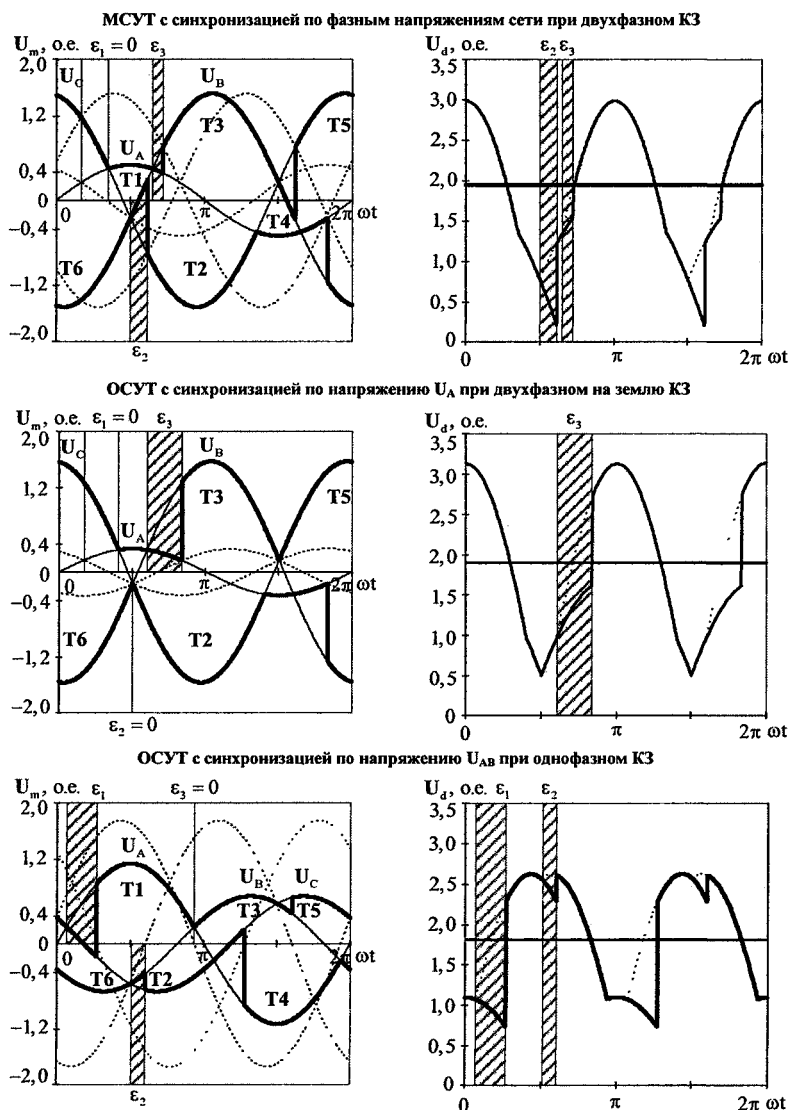


Рис. 4. Напряжения на элементах тиристорной системы самовозбуждения генератора ТГВ-200-2М при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

равному 603 В. Интервалы запаздывания отмечены в виде заштрихованных областей. При синхронизации по фазным напряжениям управляющий импульс подается на тиристор с задержкой в 30 эл. град с момента перехода через нуль фазного напряжения сети. При синхронизации по линейным напряжениям – в момент перехода через нуль линейного напряжения. На графике для МСУТ с синхронизацией по фазным напряжениям импульс управления на первом и четвертом тиристорах появляется раньше положительного напряжения, в то время как у остальных тиристоров импульсы запаздывают. На графиках выпрямленного напряжения пунктирной линией отмечены кривые с нулевыми интервалами запаздывания, соответствующие МСУТ с синхронизацией по линейным напряжениям. Средние значения выпрямленного напряжения в относительных единицах для МСУТ и ОСУТ с различными способами синхронизации при всех видах несимметричных КЗ представлены в табл. 3.

Оценка величины кратности форсировки возбуждения по напряжению. Кратности форсировки по напряжению турбогенератора соответствует потолочное установившееся напряжение ССВ, выраженное в долях номинального напряжения ОВ [1]

$$K_U = \frac{U_d}{U_{\text{ном}}} \quad (6)$$

В квазиустановившемся режиме ЭДС генератора напрямую зависит от величины тока возбуждения, что в свою очередь затрудняет оценку кратности форсировки в аналитической форме. В данном случае для сравнения эффективности различных способов управления ограничимся оценкой кратности напряжения возбуждения на начальном этапе форсирования.

Уравнение преобразователя в номинальном режиме:

$$U_{\text{днол}} = \frac{3\sqrt{6} \cdot E_{\text{уном}}}{\pi} \cos(\alpha_{\text{ном}}) - \frac{3}{\pi} I_{\text{днол}} x_{\gamma} \quad (7)$$

Воспользуемся формулами (5) и (7) и выразим кратность форсировки на начальном этапе через параметры элементов

$$K_U = \frac{E_r^*}{\cos(\alpha_{\text{ном}})} \cdot \frac{\sqrt{(x_{\text{вн}}^{(n)} + k \cdot x_2)^2 - x_{\text{вн}}^{(n)} \cdot k \cdot x_2}}{x_d^* + x_{\text{вн}}^{(n)}} \cdot [\cos(\varepsilon_{1,4}) + \cos(\varepsilon_{3,6})] + (x_{\text{вн}}^{(n)} - k \cdot x_2) \cdot \cos(\varepsilon_{2,5}) \quad (8)$$

Значения кратности форсировки для генератора ТГВ-200-2М приведены в табл. 4. Угол управления тиристорами в номинальном режиме $\alpha_{\text{ном}} = 63$ эл. град.

Оценка длительностей работы тиристоров. Соотношение длительностей работы тиристоров зависит от асимметрии питающих напряжений преобразователя. Найдем интервалы проводимости тиристоров без учета длительностей коммутаций

$$\begin{cases} \Delta t_{1,4} = \alpha_3 - \alpha_1, \\ \Delta t_{2,5} = \pi + \alpha_1 - \alpha_2, \\ \Delta t_{1,4} = \pi + \alpha_2 - \alpha_3. \end{cases} \quad (9)$$

В формуле (9) углы управления записаны относительно точки перехода через нуль напряжения фазы «А». Выразим длительности работы тиристоров через интервалы запаздывания:

$$\begin{cases} \Delta t_{1,4} = \pi - 2 \cdot \arctg \left| \frac{x_{\text{вн}}^{(n)} - k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{\text{вн}}^{(n)} + k \cdot x_2)} \right| + \varepsilon_3 - \varepsilon_1; \\ \Delta t_{2,5} = \frac{\pi}{2} + \arctg \left| \frac{x_{\text{вн}}^{(n)} - k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{\text{вн}}^{(n)} + k \cdot x_2)} \right| + \varepsilon_1 - \varepsilon_2; \\ \Delta t_{1,4} = \frac{\pi}{2} + \arctg \left| \frac{x_{\text{вн}}^{(n)} - k \cdot x_2}{\sqrt{3}(x_{\text{вн}}^{(n)} + k \cdot x_2)} \right| + \varepsilon_2 - \varepsilon_3. \end{cases} \quad (10)$$

Таблица 3

Напряжение возбуждения генератора ТГВ-200-2М при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

Вид КЗ	Способ управления							
	МСУТ		ОСУТ					
	U _Л	U _Ф	U _А	U _В	U _С	U _{АВ}	U _{ВС}	U _{СА}
K ⁽²⁾	2,01	1,94	1,92	2,00	1,73	2,01	1,92	1,54
K ^(1,1)	2,04	1,92	1,90	2,01	1,64	2,04	1,90	1,30
K ⁽¹⁾	2,02	1,96	1,97	1,72	2,02	1,84	1,97	2,02

Примечание. Значения приведены к напряжению обмотки НН трансформатора ССВ $U_{\text{Фном}} = 603$, В.

Таблица 4

Кратность форсировки по напряжению генератора ТГВ-200-2М на начальном этапе при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

Вид КЗ	Способ управления							
	МСУТ		ОСУТ					
	U _Л	U _Ф	U _А	U _В	U _С	U _{АВ}	U _{ВС}	U _{СА}
K ⁽²⁾	1,90	1,83	1,81	1,88	1,63	1,90	1,81	1,45
K ^(1,1)	1,92	1,81	1,79	1,89	1,55	1,92	1,80	1,23
K ⁽¹⁾	1,90	1,85	1,86	1,62	1,90	1,73	1,86	1,90

Таблица 5

Длительности интервалов проводимости тиристорov CCB генератора ТГВ-200-2М
при несимметричном КЗ за повышающим трансформатором

Вид КЗ	Тиристор	Способ управления							
		МСУТ		ОСУТ					
		U _Л	U _Ф	U _А	U _В	U _С	U _{АВ}	U _{BC}	U _{CA}
К ⁽²⁾	1, 4	0,44	0,55	0,72	0,55	0,89	0,44	0,72	1,00
	2, 5	1,28	1,11	1,28	1,28	1,11	1,28	1,28	1,00
	3, 6	1,28	1,34	1,00	1,17	1,00	1,28	1,00	1,00
К ^(1,1)	1, 4	0,30	0,45	0,65	0,45	0,85	0,30	0,65	1,00
	2, 5	1,35	1,15	1,35	1,35	1,15	1,35	1,35	1,00
	3, 6	1,35	1,40	1,00	1,20	1,00	1,35	1,00	1,00
К ⁽¹⁾	1, 4	1,30	1,23	1,15	1,00	1,30	1,00	1,15	1,30
	2, 5	0,85	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,85
	3, 6	0,85	0,77	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85	0,85

Примечание: за единицу принят интервал длительностью 120 эл. град.

Значения длительностей для турбогенератора ТГВ-200-2М при внешнем несимметричном КЗ приведены в табл. 5.

Выводы. Максимальная величина выпрямленного напряжения и соответственно коэффициента форсировки при всех видах КЗ достигается с МСУТ, синхронизированной по линейным напряжениям сети, вследствие того, что моменты подачи управляющих импульсов совпадают с моментами естественного включения тиристорov (см. табл. 3, 4). В то же время при этом способе управления наблюдается большая неравномерность распределения длительностей интервалов проводимости тиристорov (табл. 5), в связи с чем тиристоры в некоторых плечах преобразователя работают на интервалах, превышающих 120 эл. град. на 28–35 %. Это может вызвать существенный перегрев тиристорov.

Более эффективным было бы применение нескольких способов управления с автоматическим выбором оптимального способа и переходом с одного на другой в зависимости от длительности форсировки напряжения и вида несимметричного КЗ. Применение такого подхода невозможно реализовать в системах управления, выполненных на прежней элементной базе без применения микропроцессоров. Программная реализация

логики работы СУТ на основе цифровых микроконтроллеров позволяет расширить ее функциональные возможности в сторону повышения эффективности работы системы самовозбуждения в различных режимах работы синхронного генератора в частности при форсировании близких несимметричных коротких замыканий.

Таким образом, становится возможной разработка гибридных алгоритмов управления для МПС СУТ, использующих несколько принципов управления.

Литература

- ГОСТ 21558-2000. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
- Глебов, И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин / И.А. Глебов. – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1979. – 313 с.
- Писарев, А.Л. Управление тиристорными преобразователями (системы импульсно-фазового управления) / А.Л. Писарев, Л.П. Деткин. – М.: Энергия, 1975. – 264 с.
- Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / И.А. Глебов. – Л.: Наука, 1987. – 344 с.

Поступила в редакцию 25.02.2008 г.

Гольдштейн Михаил Ефимович, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ, канд. техн. наук, профессор. Научные интересы связаны с развитием систем электроэнергетики с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Goldstein Michael Efimovich. Head of the Electric Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University, Chelyabinsk. Scientific interests: power electronic systems, development of synchronous generator excitation systems, and engineering education.

Горшков Константин Евгеньевич, аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем ЮУрГУ. Окончил ЮУрГУ в 2006 г. по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Gorshkov Konstantin Evgenievich. Graduated from South Ural State University in the field of study "Relay protection and automation of electrical power systems". Post-graduate student of the Electric Power Stations, Networks and Systems department of South Ural State University. Scientific interests: modeling and simulation of power electronics systems, synchronous generator excitation systems, transition processes.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.9.048.06

ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА IGBT

Н.М. Сапрунова, Е.В. Корниенкова
г. Челябинск, ЮУрГУ

TRANSITIVE CHARACTERISTICS OF AN IGBT TRANSISTOR CONTROL CIRCUIT

N.M. Saprunova, E.V. Kornienkova
Chelyabinsk, SUSU

Рассматриваются переходные процессы в цепи управления при неидеальном сигнале управления. Построены номограммы относительных значений напряжений и тока для различного соотношения параметров.

Ключевые слова: транзисторы IGBT, цепи управления, переходные характеристики.

The transitive processes in the control circuit by non-ideal signal of control are considered. The nomograms of relative figures of voltage and direct currents for different correlation of parameters were plotted.

Keywords: IGBT transistor, control circuit, transitional processes.

При использовании транзисторов типа IGBT (БТИЗ) представляют интерес переходные характеристики в области малых и больших времен. В данной работе рассматриваются переходные процессы цепи управления в области малых времен. Пусть источник входного сигнала представлен импульсом с амплитудой U_m , который действует в цепи, показанной на рис. 1, где R_r – сопротивление источника сигнала.

Форма входного импульса приведена на рис. 2, где t_n – время нарастания сигнала. Измене-

ние входного сигнала на участке t_n принимается

линейным: $u(t) = \frac{U_m}{t_n} \cdot t$.

Эквивалентная схема входной цепи для первого интервала работы приведена на рис. 3. Первый интервал времени t_1 определяется пороговым напряжением U_n , при котором начинается включение транзистора.

Эквивалентная емкость входной цепи транзистора – $C_3 = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_3$, эквивалентное сопро-

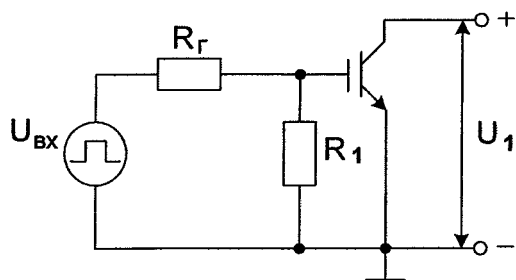


Рис. 1. Схема цепи управления транзистора

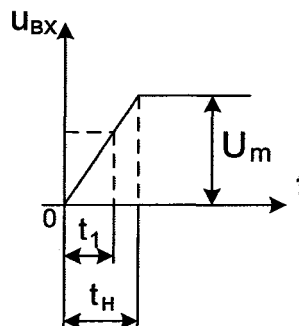


Рис. 2. Форма входного сигнала

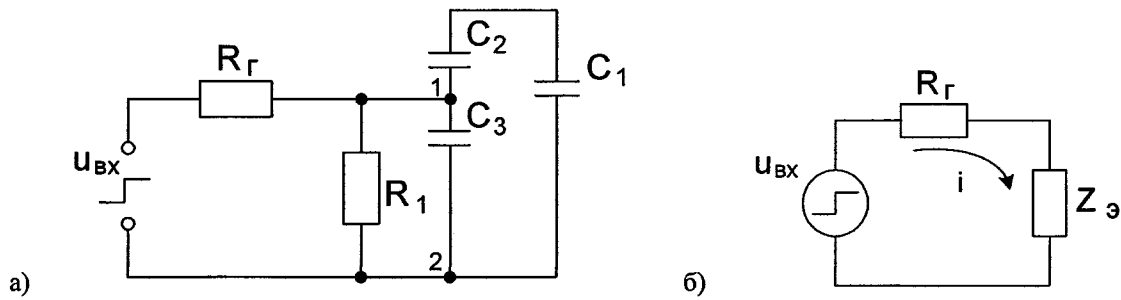


Рис. 3. Расчетная схема для первого интервала:
 C₁ – емкость коллектор-эмиттер, C₂ – емкость затвор-коллектор, C₃ – емкость затвор-эмиттер

тивление в схеме замещения рис. 3б –

$$Z_э(p) = \frac{R_1}{1 + pR_1C_3}.$$

Переходные характеристики для напряжения в точках 1–2 и тока емкости C₃ представлены выражениями (1) и (2):

$$u_{вх}(t) = \frac{U_m t}{t_n} \cdot \frac{R_1}{R_g + R_1} - \frac{U_m}{t_n} \cdot \frac{R_1^2}{(R_g + R_1)^2} \cdot R_g C_3 \times \left[1 - \exp\left(-\frac{t(R_g + R_1)}{R_g R_1 C_3}\right) \right], \quad (1)$$

$$i_c(t) = \frac{U_m}{t_n} \cdot \frac{R_1 C_3}{R_g + R_1} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t(R_g + R_1)}{R_g R_1 C_3}\right) \right]. \quad (2)$$

В некоторый момент времени напряжение на участке затвор-эмиттер нарастает до порогового значения:

$$U_n = \frac{U_m t_1}{t_n} \cdot \frac{R_1}{R_g + R_1} - \frac{U_m}{t_n} \cdot \frac{R_1^2}{(R_g + R_1)^2} \cdot R_g C_3 \times \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1(R_g + R_1)}{R_g R_1 C_3}\right) \right]. \quad (3)$$

В выражении (3) время t₁ – это время первого интервала переходного процесса, которое в явном виде не определяется. Предлагается графическое решение уравнения (3), поэтому удобно представить его в следующем виде:

$$\frac{U_n}{U_m} = \frac{t_1}{A \cdot t_n} - \frac{t_1}{A^2 \cdot t_n} \cdot \frac{R_g C_3}{t_1} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1(R_g + R_1)}{R_g R_1 C_3}\right) \right]. \quad (4)$$

Для графического решения уравнения (4) удобно воспользоваться относительными едини-

цами: $t_1/R_g C_3$, U_n/U_m , t_1/t_n , $(R_g + R_1)/R_1 = A$.

Область изменения относительных величин U_n/U_m , t_1/t_n выбирается исходя из того, что $U_n < U_m$, $t_1 < t_n$. Если учесть, что величина R_г соизмерима с R₁, то диапазон изменения A составляет от 1,2 до 3,0. Совокупность кривых для значений $t_1/t_n = 0,4$ и $0,8$ при изменении A приведена на рис. 4, для значений $t_1/t_n = 0,2$ и $0,6$ – на рис. 5, где $B = \frac{U_n}{U_m}$.

Пусть заданы $U_n/U_m = 0,15$ и $A = 1,5$; по значению $B = 0,15$ на рис. 4 и рис. 5 находится пересечение прямой с одной из кривых со значением $A = 1,5$. Пересечение может попасть в область изменения $t_1/t_n = 0,6$ или $0,8$, если $A \leq 3,0$. Тогда находится относительное время $t_1/R_g C_3$.

Ток, протекающий через емкость C₃, также удобно выразить в относительных единицах. Его относительное значение в момент времени t₁ зависит от величин t_1/t_n , $t_1/R_1 C_3$, $t_1/R_g C_3$:

$$\frac{i \cdot R_1}{U_m} = \frac{t_1}{A \cdot t_n} \cdot \frac{R_1 C_3}{t_1} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{A t_1}{R_g C_3}\right) \right]. \quad (5)$$

Совокупность кривых $F = iR_1/U_m$ для значений $t_1/t_n = 0,4$ и $0,8$ приведена на рис. 6, для значений $t_1/t_n = 0,2$ и $0,6$ – на рис. 7. Для изменения величины A взяты те же пределы, что и на рис. 4 и рис. 5. В отличие от напряжения в токе появляется дополнительная переменная – $D = t_1/R_1 C_3$. При построении она принята 0,5.

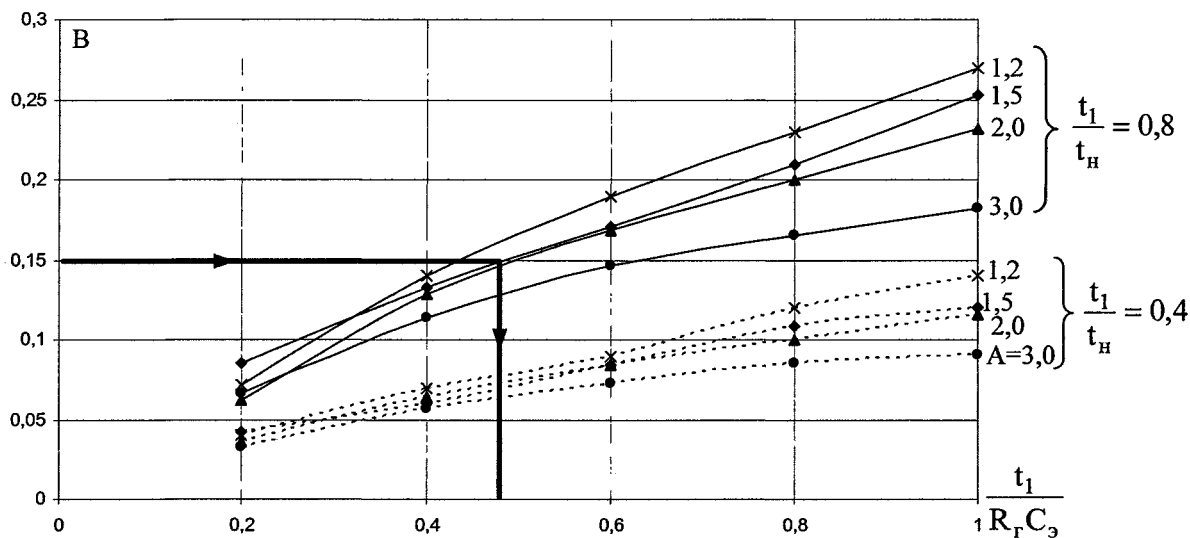


Рис. 4. Изменение относительного порогового напряжения затвора для $t_1/t_n = 0,4$ и $0,8$

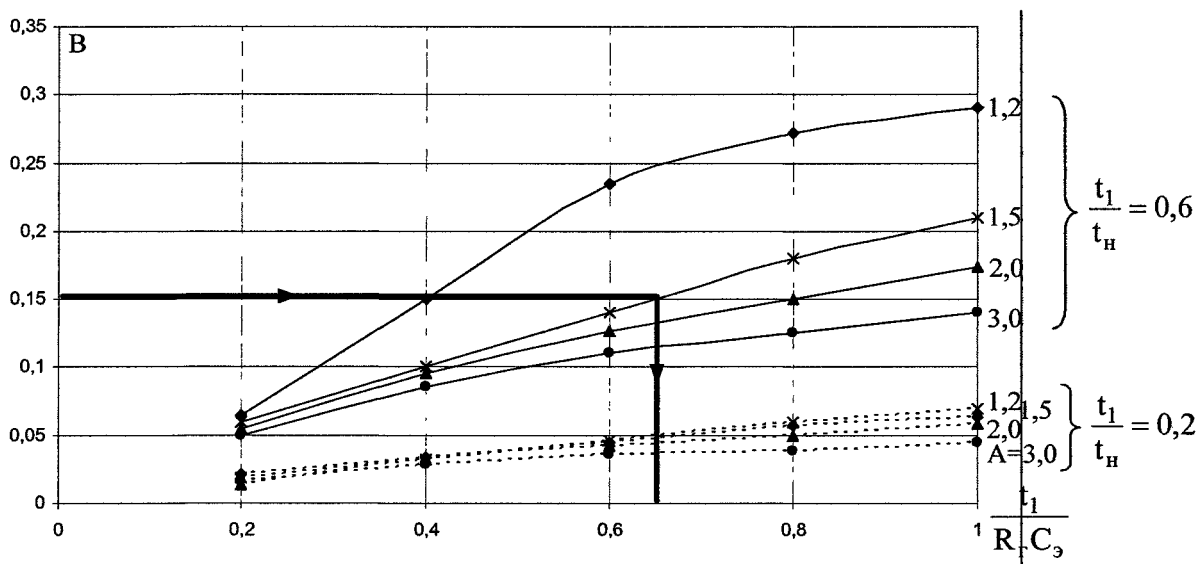


Рис. 5. Изменение относительного порогового напряжения затвора для $t_1/t_n = 0,2$ и $0,6$

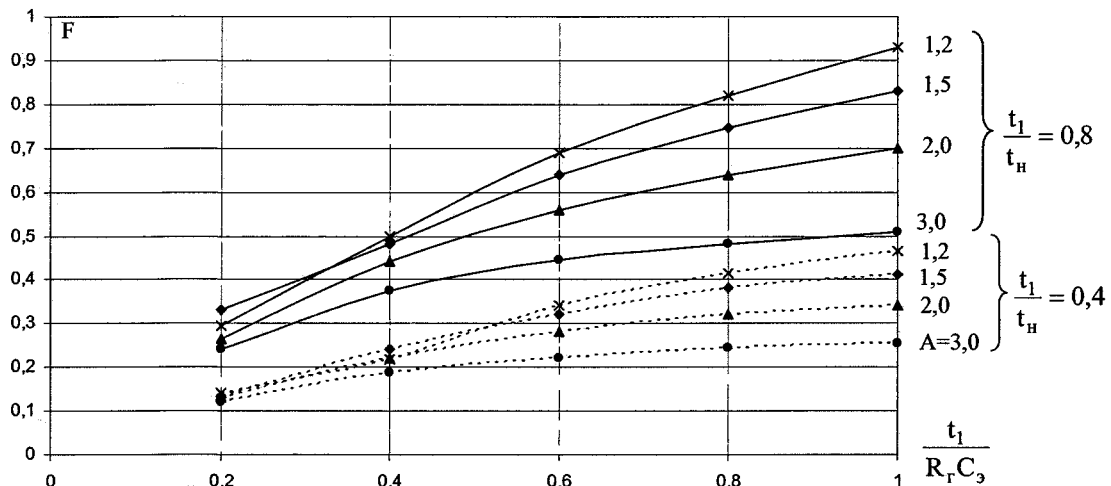
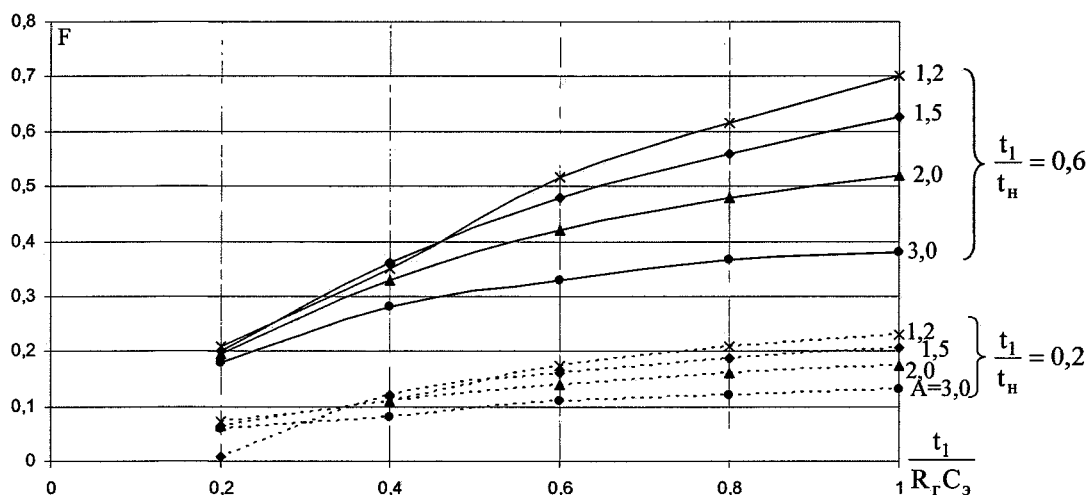
На втором интервале работы нарастает ток выходной цепи до уровня 0,9 от установившегося значения и падает напряжение коллектор-эмиттер. Емкость C_1 шунтируется выходной цепью, а через емкость C_2 возникает обратная связь с цепью затвора, поэтому в схеме замещения рис. 3б эквивалентная емкость возрастает до значения C_{31} . Напряжение на затворе определяется выражением (4), т.е. вид уравнения не изменяется:

$$u(t) = U_n + \frac{(U_m - U_n)t}{A \cdot t_n} - \frac{U_m}{A^2 \cdot t_n} \cdot R_r C_{31} \times$$

$$\times \left[1 - \exp\left(-\frac{t(R_r + R_1)}{R_r R_1 C_{31}}\right) \right], \quad (6)$$

Относительные изменения напряжения на емкости C_{31} такие же, как на первом интервале работы, поэтому их можно определить по рис. 4, 5, зная время нарастания тока выходной цепи.

На третьем интервале работы транзистор достигает точки насыщения, поэтому действие обратной связи прекращается, следовательно, эквивалентная емкость уменьшается. Относительные изменения напряжения определяются из выражения (6).

Рис. 6. Изменение относительного тока затвора для $t_1/t_n = 0,4$ и $0,8$ Рис. 7. Изменение относительного тока затвора для $t_1/t_n = 0,2$ и $0,6$

Значение функции F в конце второго и третьего интервалов работы определяется выражением (5), в котором вместо времени t_1 берется интервал (t_1+t_2) и соответственно интервал $(t_1+t_2+t_3)$, где t_2 – продолжительность второго интервала, а t_3 – третьего.

Итак, в случае неидеального входного сигнала определены законы изменения напряжения на

участке затвор-эмиттер и тока через входную емкость, а также построены номограммы для различного соотношения параметров схемы.

Литература

1. Силовые IGBT – модули фирмы Siemens / Материалы по применению / под ред. Ю.К. Разанова. – М.: Додэка, 1997.

Поступила в редакцию 12.01.2008 г.

Сапрунова Надежда Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода ЮУрГУ.

Saprunova Nadezhda Mikhailovna – candidate of technical sciences, associate professor of the Electric Drive department of South Ural State University.

Корниенкова Екатерина Викторовна – студентка энергетического факультета ЮУрГУ.

Kornienkova Ekaterina Viktorovna – student of the Power Engineering faculty of South-Ural State University.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 519.876.5

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОМОЩЬЮ ГРАФИЧЕСКОГО ЯЗЫКА ПРОГРАММЫ JIGREIN

Н.В. Клиначев, Н.В. Клиначева
г. Челябинск, ЮУрГУ

PRESENTATION OF MATHEMATICAL MODELS OF ELECTRICAL MACHINES BY MEANS OF JIGREIN GRAPHICAL LANGUAGE

N.V. Klinachev, N.V. Klinacheva
Chelyabinsk, SUSU

Представлен обзор моделей электрических машин, выполненных в программе Jigrein по технологии, предусматривающей итерацию потенциалов в узлах энергоцепей.

Ключевые слова: компьютерное моделирование технических систем, ориентированный граф, неориентированный граф, итерация потенциалов, модель МПТ, модель асинхронного двигателя, модель синхронной машины.

Review of electrical machine models is presented. Models are executed in the programme Jigrein according to the technology providing iterations of potentials in nodes of power circuit.

Keywords: computer modelling of technical systems, oriented graph, undirected graph, iteration of potentials, dc machine model, induction motor model, synchronous machine model.

В последнее десятилетие в математическом моделировании технических систем обозначилась проблема эффективного представления математических моделей. Масштаб разрабатываемых моделей возрастает, но ограничивается качеством интерфейса их представления. Это означает, что, начиная с определенного порога, уточнять модель и наращивать её размер бесполезно – по прошествии некоторого времени сам автор не сможет уверенно в ней ориентироваться. По этой причине разработчики моделирующих программ ведут постоянный поиск новых вариантов представления моделей.

Если объединить интересы специалистов, выраженные в предпочтениях тех или иных моделирующих программ, то, по всей видимости, решение следует искать в интеграции блок-схем и схем физических принципиальных. Дополнительным требованием является возможность полной деинкапсуляции всех УГО физических устройств.

Но, несмотря на то, что теория расчета цепей представила специалистам по математическому моделированию широкий спектр расчетных методов, по ряду причин проблематично их трансформировать из текстовой формы в графическую. При

этом каждая успешная попытка порождает новый графический язык и тысячи моделей пользователей. Именно такая ситуация наблюдается с пакетом Simulink, где модели строятся по законам Ома и Кирхгофа на основе правил, предполагающих итерацию токов.

Эта технология также реализована разработчиками многих программ: 20-Sim, MBTU, K2.SimKernel, – и до сих пор лидирует в блочных пакетах, стремящихся поддержать физическое моделирование. По мнению авторов, это неудачное решение. Видимо, всех сбilo с толку семейство Spice-программ, основанное на использовании альтернативной технологии построения моделей (предполагающей итерацию потенциалов), но упорно опирающееся на черные ящики.

Авторам удалось развить это альтернативное решение – графический язык программы Jigrein основан на технологии моделирования, предполагающей итерацию потенциалов в узлах [1], и поддерживает полную деинкапсуляцию моделей. Новый графический язык и неиспользованная ранее в его контексте технология моделирования потребовали перестройки всех моделей технических уст-

Обратимый трансформатор энергий

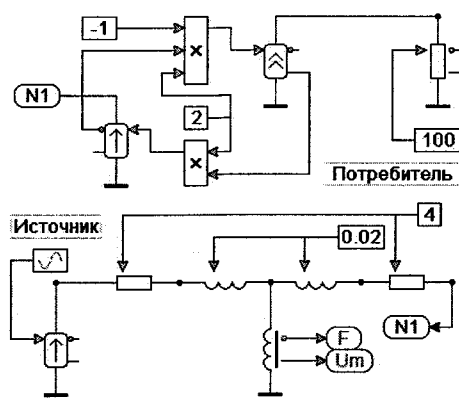


Рис. 1. Модель трансформатора на базе Т-образной схемы замещения

Машина постоянного тока

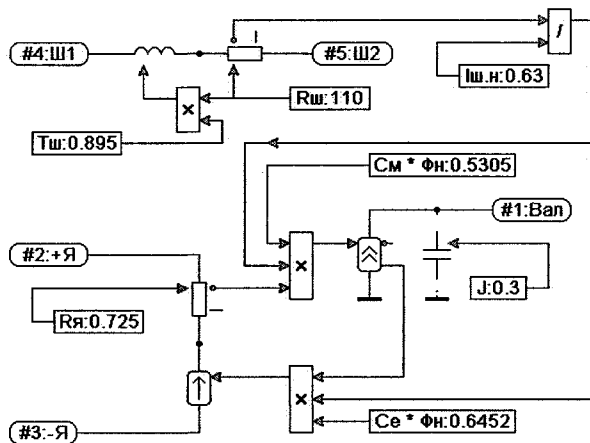


Рис. 2. Модель машины постоянного тока на базе обратимого трансформатора энергий

ройств. Читатель может самостоятельно сравнить результат с тем, что имеется в Simulink'e, по представленному обзору моделей электрических машин (см. рис. 1–5). Можно отметить ряд преимуществ. Несмотря на частичное несоответствие правилам оформления электрических схем, модели

узнаваемы и легко читаемы. Используемая модель узла единая, масштабируемая, с взаимозаменяемыми выводами. Выводы моделей RLC-элементов неполярные (допустимо подключение к узлам в любом порядке). Блок-схемы моделей RLC-элементов статические (не требуют автоматиче-

Однофазный асинхронный двигатель

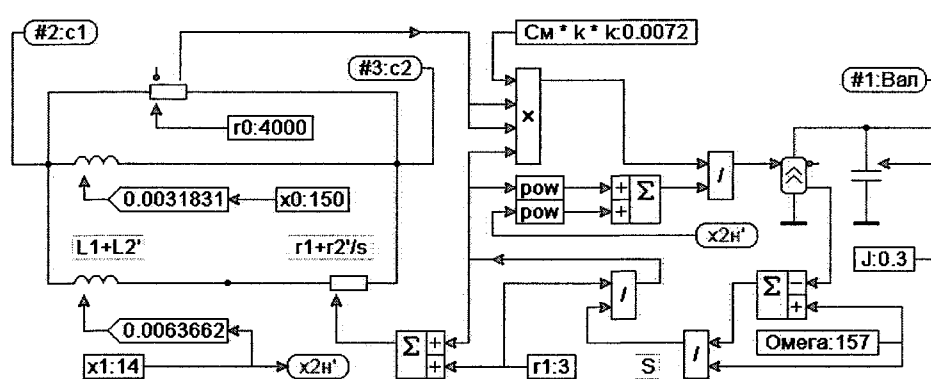


Рис. 3. Модель однофазного асинхронного двигателя на базе Г-образной схемы замещения



Рис. 4. Пример построения модели из условных графических обозначений физических устройств и математических блоков

ских модификаций). Возможна деинкапсуляция моделей ниже уровня элементов схем замещений. Модели характеризуются большим количеством вычислений, которые могут быть выполнены параллельно. Из недостатков отметим тот факт, что итерация потенциалов не оптимальна для расчета цепей с большим количеством последовательных соединений элементов.

Основу каждой машины составляет «обратимый трансформатор энергий». КПД этого абстрактного устройства всегда 100%. Его можно увидеть в модели трансформатора, в МПТ, чуть более сложную версию – в синхронной машине.

Разработанная для конкретной машины модель обратимого трансформатора не должна подвергаться изменениям. А вот обвеску, задача которой – учесть те или иные потери, можно менять в соответствии с задачами. Например, можно добавить индуктивность в цепь якоря МПТ или активные сопротивления в обмотки синхронной машины. Этой идее не подчиняется лишь модель асинхронного двигателя, в которой трансформатор энергий не обратимый (на первичной стороне не источник, а сопротивление r_2'/s). У пользователей программы Jiggin есть возможность доработать модель в соответствии с общим подходом [2].

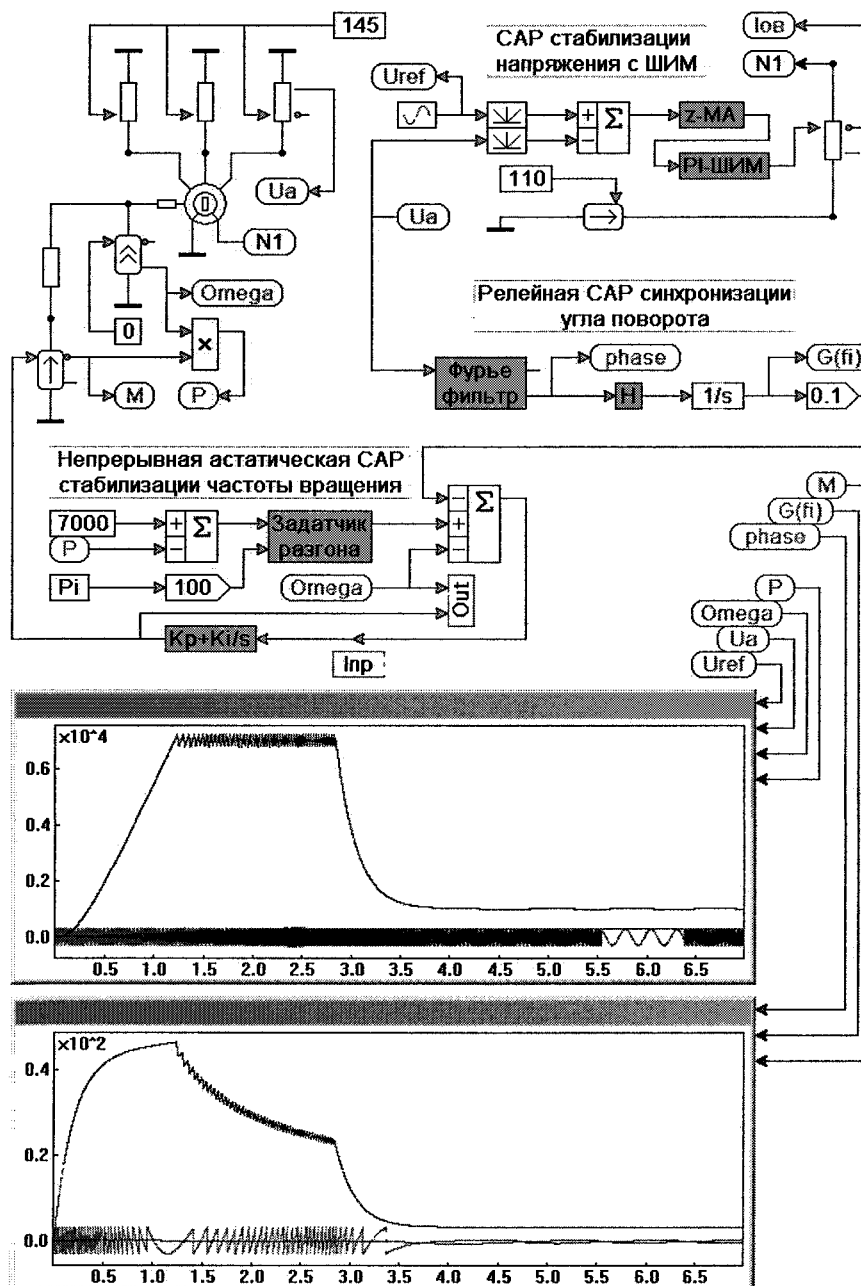


Рис. 5. Пример интеграции математических блоков, элементов схем замещений и УГО физических устройств на одном чертеже

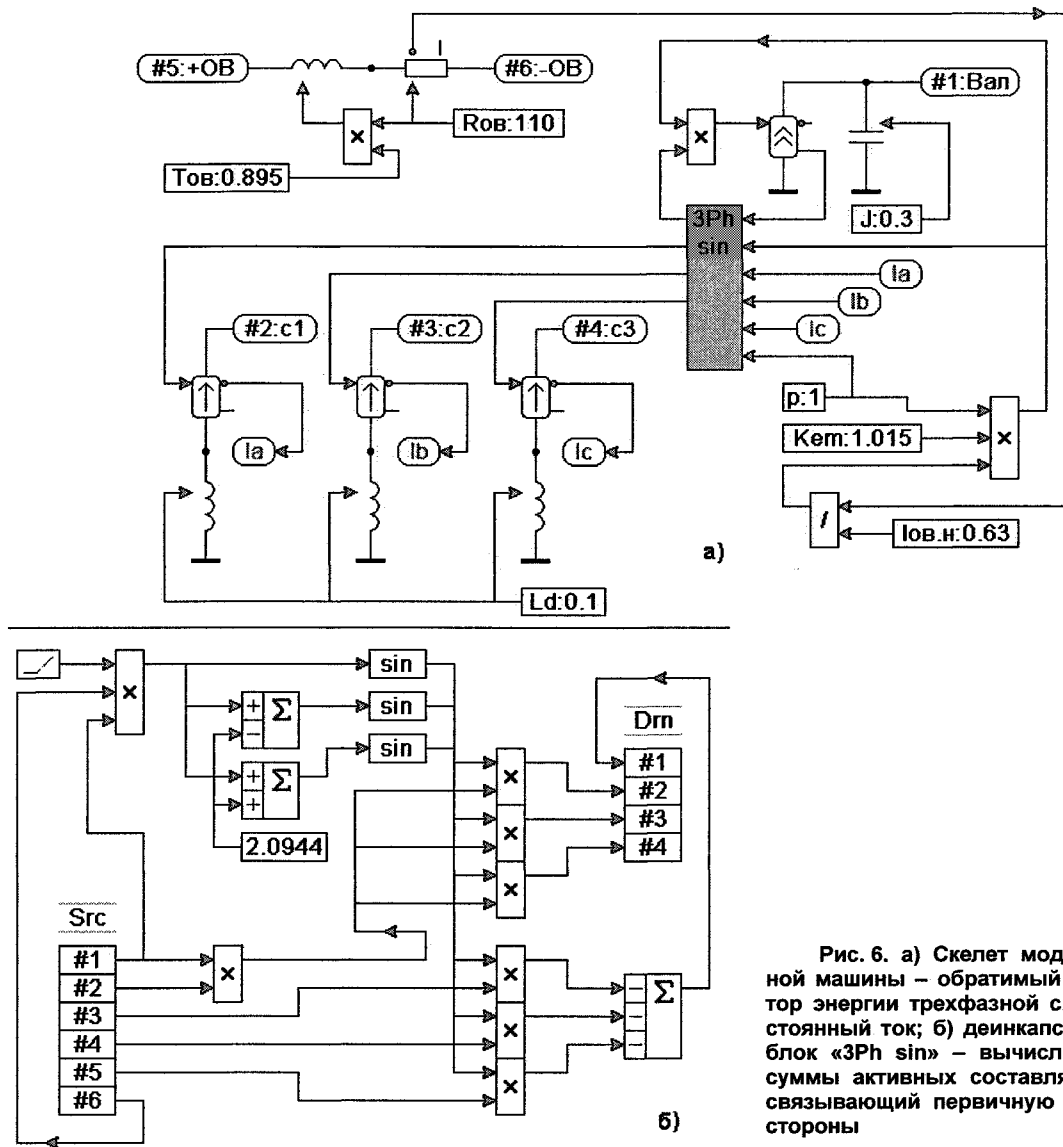


Рис. 6. а) Скелет модели синхронной машины – обратимый трансформатор энергии трехфазной системы в постоянный ток; б) деинкапсулированный блок «3Ph sin» – вычислитель ЭДС и суммы активных составляющих токов, связывающий первичную и вторичную стороны

Литература

1. Клиначев, Н.В. О способе формализации применения законов Ома и Кирхгофа до уровня программных алгоритмов / Н.В. Клиначев, Н.В. Клиначева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Ком-

пьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2006. – №14(69). – С. 93–96.

2. Клиначев, Н.В. Домашняя страница программы Jigrein / Н.В. Клиначев, Н.В. Клиначева. – <http://model.exponenta.ru/k2/20070810.htm>

Поступила в редакцию 20.12.2007 г.

Клиначев Николай Васильевич – к.т.н., доцент кафедр «Электромагнитные и электромеханические системы», «Электротехника», «Информатика».

Klinachev Nikolay Vasilievich. Candidate of technical sciences, associated professor of the Electromagnetic and Electromechanical Systems department and Informatics department of South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: klinacherv_nv@mail.ru.

Клиначева Наталья Васильевна – аспирант кафедры «Электротехника».

Klinacheva Natalia Vasilievna. Post-graduate student of the Electrical Engineering department of South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: klinacheva@mail.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКО-ТОРМОЗНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАШИНЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ ВАЛКОВ

*А.Д. Стригов, А.С. Сарваров
г. Магнитогорск, МГТУ*

SIMULATION OF START-UP AND BRAKING CONDITIONS OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE MACHINE OF CENTRIFUGAL CASTING OF ROLLERS

*A.D. Strigov, A.S. Sarvarov
Magnitogorsk, G. I. Nosov Magnitogorsk State Technical University*

С учетом требований к электроприводу машины центробежного литья валков предложен вариант его реализации на основе двухдвигательной системы тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель. Создана электромеханическая модель системы, на которой проведены исследования процессов пуска и торможения с учетом теплового состояния обмоток двигателей.

Ключевые слова: машина центробежного литья валков, электропривод, тиристорный преобразователь напряжения, асинхронный двигатель.

According to the requirements it was proposed to implement the electric drive of the machine of centrifugal casting of rollers on the basis of the two-motor system thyristor voltage converter – induction motor.

Keywords: machine of centrifugal casting of rollers, electric drive, thyristor voltage converter, induction motor.

В условиях современного металлургического предприятия стало целесообразным организовать изготовление прокатных валков непосредственно на близлежащих производственных площадях. С этой целью в цехе изложниц ЗАО «Механоремонтный комплекс» ОАО «ММК» введена в эксплуатацию горизонтальная машина центробежного литья валков. Конструктивно данная машина представляет собой агрегат, состоящий из кокиля, установленного на 4-х опорных роликах, два из которых имеют индивидуальный привод от гидравлических двигателей. Передача механической энергии от приводных роликов к кокилю осуществ-

ляется через фрикционную связь. Гидродвигатели приводятся во вращение от единой гидросистемы, давление в которой создается гидронасосом, привод которого реализован на базе короткозамкнутого асинхронного двигателя мощностью 250 кВт. Характерной особенностью литейного агрегата является высокий приведенный момент инерции ($794 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$) и относительно низкий момент сопротивлений, обусловленный при работе в режиме литья только силами трения [1]. Схематично, литейная установка представлена на рис. 1.

Гидропривод реализует следующие технологические режимы:

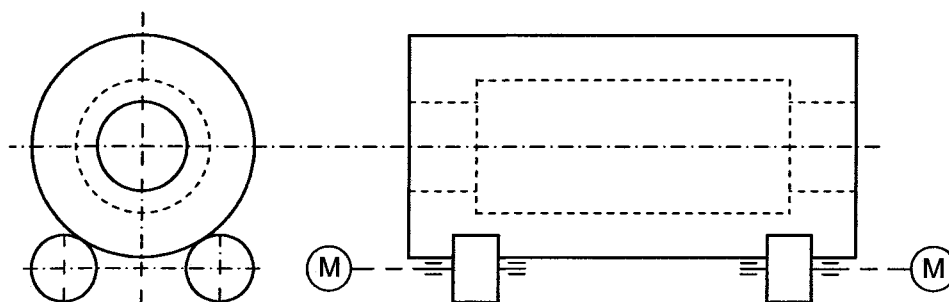


Рис. 1. Схематическое изображение кокиля и роликов центробежной машины

1. Плавный разгон и торможение до рабочей или промежуточной скорости и обратно до полной остановки. Причем длительность разгона находится в пределах 300 секунд и не обусловлена технологическими требованиями, а длительность торможения жестко привязана к технологии изготовления и не должна превышать 300–360 секунд по условиям охлаждения рабочего слоя валка.

2. Создание основной частоты вращения роликов на уровне 1500 об/мин и промежуточной ступени с частотой вращения 500 об/мин.

На пониженной частоте вращения производятся технологические операции по подготовке кокиля к заливке металла.

К недостаткам существующего гидропривода следует отнести высокие эксплуатационные затраты, связанные с особенностями обслуживания гидросистемы. Кроме того, в этой системе отсутствует возможность рекуперации запасенной кинетической энергии вращающихся масс обратно в сеть. Переход к электрическому приводу позволит в значительной мере устранить данные недостатки.

Применительно к данной машине предлагается рассмотреть вариант построения двухдвигательного электропривода по системе тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель (ТПН–АД) с последовательным соединением статорных обмоток. На рис. 2 представлена принципиальная схема предложенной системы электропривода. В этой схеме величина фазного напряжения на каждом двигателе составляет 0,5 линейного напряжения, т.е. 86% от фазного значения. Кроме того, данная трехпроводная схема питания обеспечивает независимое питание каждой пары последовательно соединенных обмоток двигателей.

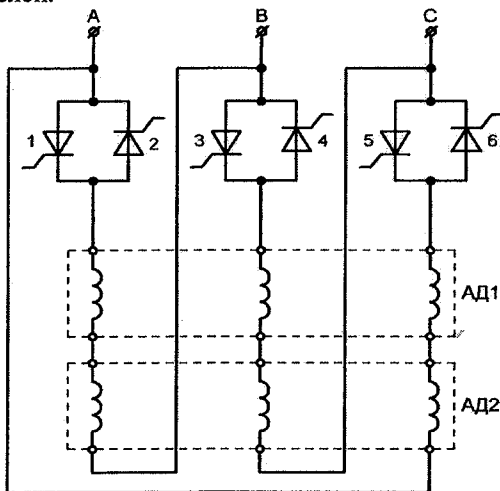


Рис. 2. Схема двухдвигательной системы ТПН–АД

Исследования пуско-тормозных режимов в системе ТПН–АД проводились на основе компьютерного моделирования. Необходимость разработки модели двухдвигательной системы с последовательным соединением статорных обмоток обусловлена тем, что в пакете Matlab отсутствуют модели АД с отдельно выделенными фазными обмотками статора. При этом в качестве базового используется математическое описание асинхронного двигателя в неподвижной системе координат «a, b, c» [2]. Такая модель позволяет воспроизвести реальную картину процессов изменения токов статора с учетом особенностей коммутационных процессов в преобразователе.

Система дифференциальных уравнений для рассматриваемой двухдвигательной системы имеет следующий вид:

$$\begin{cases} u_{sa} = (R_{s1} + R_{s2}) \cdot i_{sa} + \frac{d\psi_{sa1}}{dt} + \frac{d\psi_{sa2}}{dt}; \\ u_{sb} = (R_{s1} + R_{s2}) \cdot i_{sb} + \frac{d\psi_{sb1}}{dt} + \frac{d\psi_{sb2}}{dt}; \\ u_{sc} = (R_{s1} + R_{s2}) \cdot i_{sc} + \frac{d\psi_{sc1}}{dt} + \frac{d\psi_{sc2}}{dt}; \\ 0 = R_{r1} \cdot i_{ras1} + \frac{d\psi_{ras1}}{dt} + \frac{(\psi_{rbs1} - \psi_{rcs1}) \cdot \omega_1}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r1} \cdot i_{rbs1} + \frac{d\psi_{rbs1}}{dt} + \frac{(\psi_{rcs1} - \psi_{ras1}) \cdot \omega_1}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r1} \cdot i_{rcs1} + \frac{d\psi_{rcs1}}{dt} + \frac{(\psi_{ras1} - \psi_{rbs1}) \cdot \omega_1}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r2} \cdot i_{ras2} + \frac{d\psi_{ras2}}{dt} + \frac{(\psi_{rbs2} - \psi_{rcs2}) \cdot \omega_2}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r2} \cdot i_{rbs2} + \frac{d\psi_{rbs2}}{dt} + \frac{(\psi_{rcs2} - \psi_{ras2}) \cdot \omega_2}{\sqrt{3}}; \\ 0 = R_{r2} \cdot i_{rcs2} + \frac{d\psi_{rcs2}}{dt} + \frac{(\psi_{ras2} - \psi_{rbs2}) \cdot \omega_2}{\sqrt{3}}; \end{cases} \quad (1)$$

где $R_{s1}, R_{s2}, R_{r1}, R_{r2}$ – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора первого и второго двигателей; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} – токи в обмотках фаз статоров; $\psi_{sa1}, \psi_{sb1}, \psi_{sc1}, \psi_{sa2}, \psi_{sb2}, \psi_{sc2}$ – результирующие потокоцепления обмоток фаз статоров; $i_{ras1}, i_{rbs1}, i_{rcs1}, i_{ras2}, i_{rbs2}, i_{rcs2}, \psi_{ras1}, \psi_{rbs1}, \psi_{rcs1}, \psi_{ras2}, \psi_{rbs2}, \psi_{rcs2}$ – соответственно преобразованные токи и потокоцепления обмоток фаз роторов; $\omega_1 = \omega_{r1} \cdot p_1, \omega_2 = \omega_{r2} \cdot p_2$; ω_{r1}, ω_{r2} – скорости вращения роторов, p_1, p_2 – число пар полюсов.

Выражения для потокоцеплений

$$\begin{cases} \psi_{sj1} = L_{s1} \cdot i_{sj} + L_{m1} \cdot i_{rjs1}; \\ \psi_{rjs1} = L_{r1} \cdot i_{rjs1} + L_{m1} \cdot i_{sj}, \end{cases} \quad (2)$$

где L_{s1}, L_{r1} – полные индуктивности обмоток статора и ротора первого двигателя, L_{m1} – взаимная индуктивность фаз статора и ротора, j – фаза двигателя (a, b, c).

Выражения для потокоцеплений второго двигателя аналогичны.

Электромагнитный момент каждого из двигателей определяется по формуле

$$M = \frac{P \cdot L_m}{\sqrt{3}} \left[(i_{rcs} - i_{rbs}) \cdot i_{sa} + (i_{ras} - i_{rcs}) \cdot i_{sb} + (i_{rbs} - i_{ras}) \cdot i_{sc} \right] \quad (3)$$

В качестве приводных были выбраны два асинхронных двигателя 5AMH250S4 мощностью 90 кВт каждый [3].

Наиболее тяжелые режимы эксплуатации приводных двигателей возникают при разгоне кокиля перед заливкой металла рабочего слоя, и при торможении – с залитым металлом. Длительность процесса разгона кокиля до рабочей скорости, согласно технологической инструкции, составляет не более 300 секунд. Общеизвестно, что процесс прямого пуска асинхронного двигателя происходит при высокой кратности статорного тока (5–7 номинальных значений). Длительный пуск в высокоинерционных механизмах при высоких токовых нагрузках может привести к перегреву двигателя и выходу его из строя. Поэтому для проверки выбранного двигателя по условиям нагрева были проведены исследования на его тепловой модели [4].

Рассматриваемая тепловая модель электродвигателя состоит из двух тел нагрева и позволяет с достаточной точностью рассчитать превышение температуры обмотки и сердечника машины как для повторно-кратковременного, так и для кратковременного режимов работы [4].

На модели были проведены исследования процессов пуска машины при прямом включении в сеть (рис. 3) и фазовом управлении. Расчеты на тепловой модели показали, что в процессе пуска перегрев изоляции обмоток возникает при достижении скорости 0,6 от основной. На модели были проведены

исследования процесса пуска электропривода при квазичастотном управлении [5]. Алгоритм квазичастотного управления определяется значениями чисел m и n (параметры КЧУ), первое из которых определяет количество тактов (временных интервалов, кратных $1/6$ периода частоты сети), в течение которых управляющие импульсы подаются на тиристоры, а второе – количество тактов, в течение которых управление преобразователем блокируется. Пониженная частота f_v основной гармоники при КЧУ определяется соотношением [5]

$$f_v = f_0 \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot k}{m+n} \right), \quad (4)$$

где f_0 – частота сети (50 Гц); k – целое число, удовлетворяющее неравенству

$$0; 1; \dots \leq k \leq \frac{2(m+n)}{6}. \quad (5)$$

Если расчетное значение частоты, определяемое выражением (4) положительно по знаку ($f_v > 0$), то составляющие фазных напряжений для этой частоты образуют прямую последовательность чередования фаз. Если $f_v < 0$, то они образуют обратную последовательность.

Разгон двигателя до рабочей скорости при КЧУ осуществляется путем ступенчатого повышения значения частоты f_v . Такой способ пуска можно рассматривать как многоступенчатый частотный пуск.

На рис. 4 показаны осциллограммы квазичастотного пуска машины при ограничении тока статора на уровне, не превышающем 1,8 номинальных значений. Расчеты на тепловой модели пока-

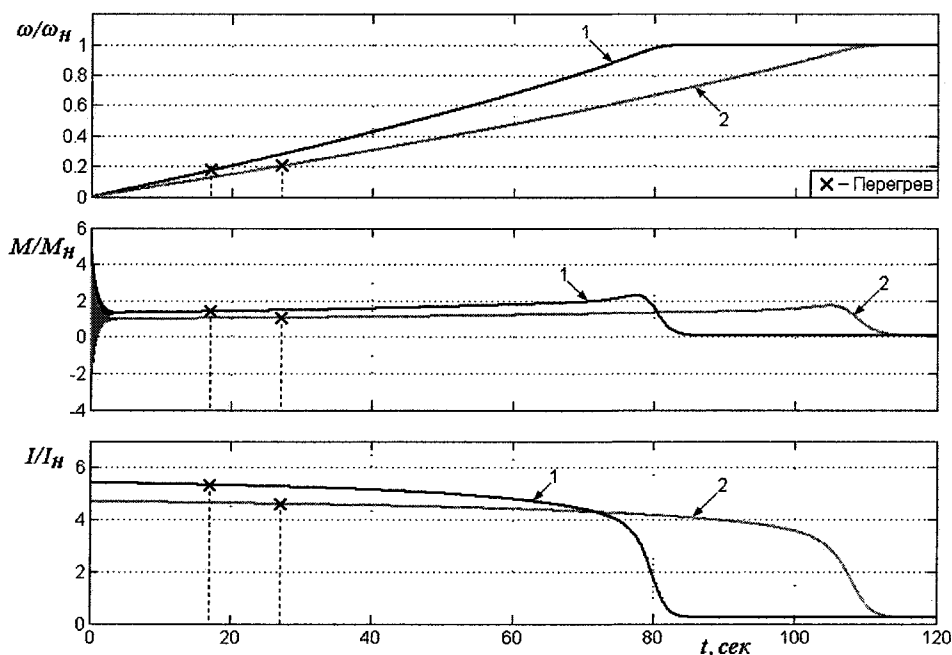


Рис. 3. Прямой пуск машины: 1 – при индивидуальном питании АД; 2 – в двухдвигательной системе

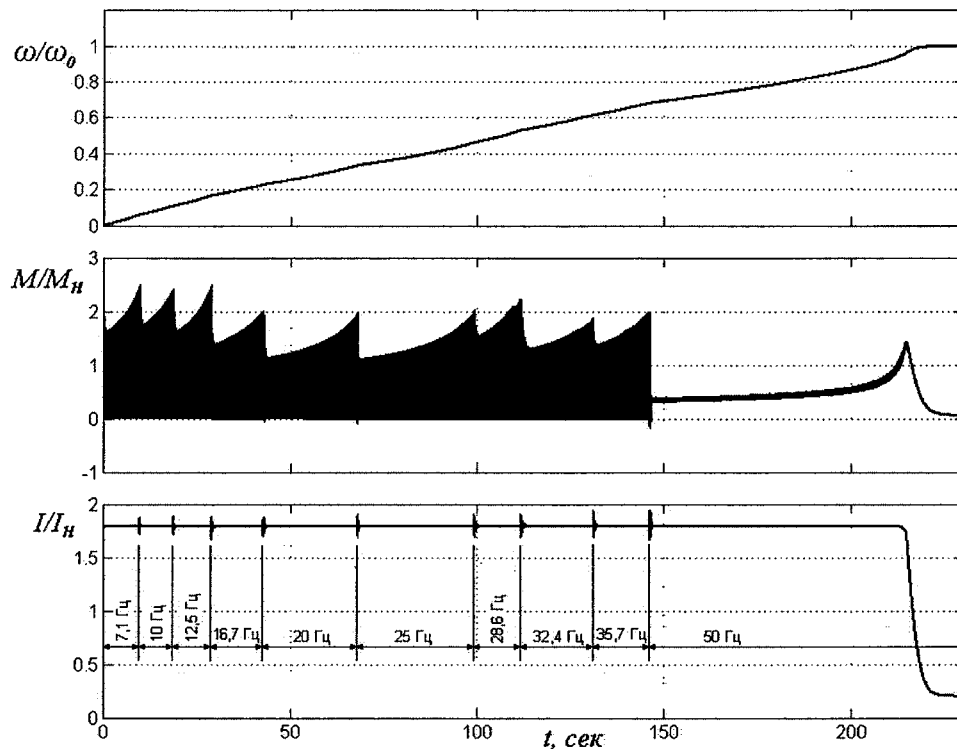


Рис. 4. Ступенчатый квазичастотный пуск машины

зали, что перегрева изоляции обмоток в этом случае не происходит.

Заливка сердцевин валка осуществляется после кокиля, поэтому для надежного сваривания металлов рабочего слоя и сердцевин длительность торможения не должна превышать 300 секунд. При свободном выбеге торможение кокиля до полной остановки происходит за 30 мин, что по условиям технологии изготовления валков недопустимо.

Торможение двигателя при КЧУ происходит путем ступенчатого понижения значения частоты f_v . Однако вблизи синхронной скорости тормозной эффект незначителен [5]. Причиной этого является наличие в выходном напряжении преобразователя наряду с основной (низкочастотной) гармонической составляющей гармоники с частотой питающей сети. Такая ситуация возникает при реализации любого алгоритма КЧУ. Эта гармоника формирует на механической характеристике двигателя в зоне подсинхронной скорости небольшой двигательный момент (рис. 5, а), в результате чего при достаточно низком моменте сопротивления на валу двигателя последний продолжает работать в двигательном режиме.

Для того чтобы устранить этот недостаток, необходимо на ходу переключить питание двух фаз преобразователя, а алгоритм КЧУ выбрать таким образом, чтобы значение пониженной частоты было $f_v < 0$. Следует отметить, что для данной установки длительность процесса переключения даже в пределах 1–2 секунд не влияет на технологический процесс.

В результате переключения питания (противовключение) возникающий двигательный момент вблизи синхронной скорости переместится из 1-го квадранта в 3-й (рис. 5, б). Кроме того, при обратной последовательности чередования фаз, т.е. при реализации условия $f_v < 0$, тормозные моменты двигателя становятся заметно больше по своим значениям, чем при прямой последовательности [6]. Вследствие чего эффективность торможения повышается, а его длительность сокращается.

При изменении последовательности чередования фаз на входе ТПН вектор питающего напряжения меняет свое направление вращения, а магнитное поле, формируемое токами статора, благодаря алгоритму КЧУ, продолжает вращаться в том же направлении что и ротор, но с меньшей частотой.

Исследования на компьютерной модели системы ТПН–АД показали, что торможение при реализации КЧУ происходит с отдачей энергии в сеть, т.е. является рекуперативным.

На рис. 6 представлены осциллограммы торможения литейной машины с реализацией КЧУ, при этом ток статора не превышает 1,8 номинальных значений. Расчеты на тепловой модели показали, что за время всего технологического цикла (разгон, заливка, торможение) перегрева изоляции обмоток двигателей не происходит.

Для поддержания темпа торможения предлагается осуществить на низких частотах вращения перевод системы ТПН–АД в режим динамического торможения, а на заключительном этапе – в режим противовключения с квазичастотой 7,1 Гц (рис. 6).

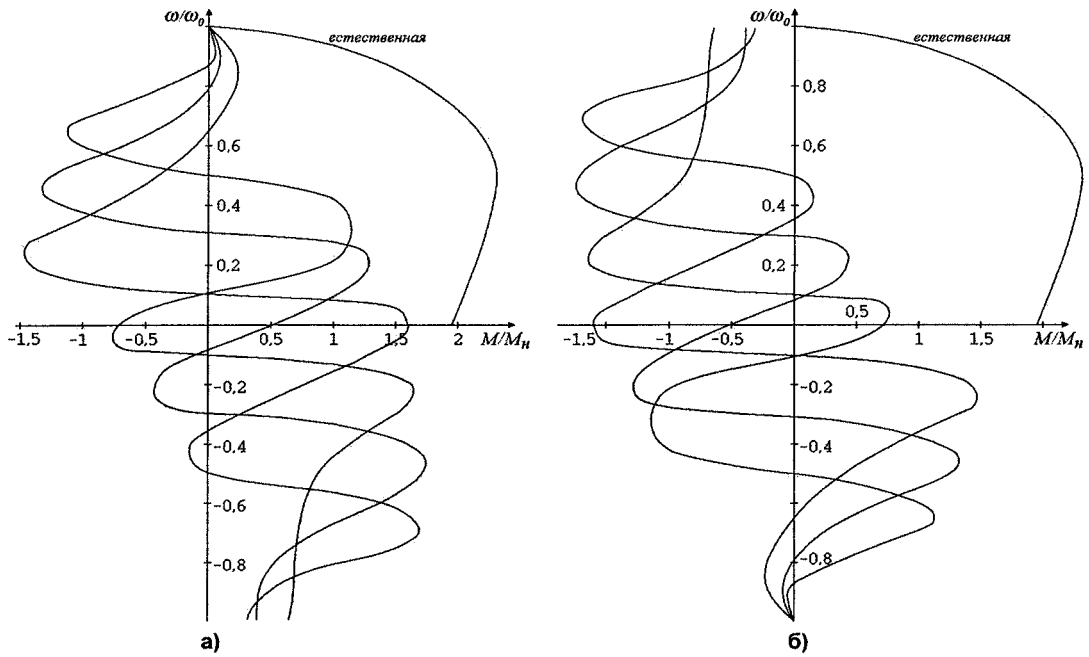


Рис. 5. Механические характеристики двигателя при квазичастотном управлении:
а) без переключения фаз; б) с переключением фаз

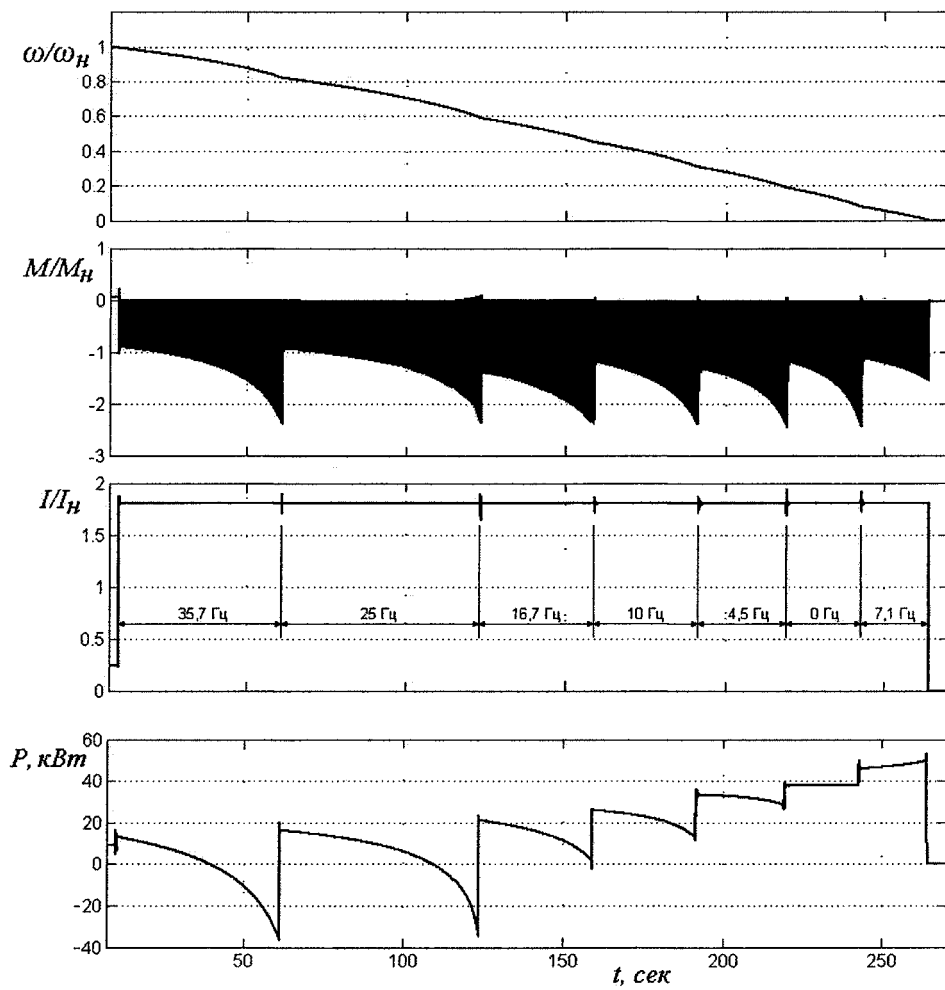


Рис. 6. Ступенчатое квазичастотное торможение машины

Таким образом, в качестве заключения можно отметить, что система ТПН–АД при реализации квазичастотного управления удовлетворяет технологическим требованиям со стороны машины литья валков по обеспечению промежуточных ступеней частоты вращения и длительности пуско-тормозных режимов.

Литература

1. Демин, С.А. Разработка электропривода машины центробежного литья валков для прокатных станков / С.А. Демин, А.С. Сарваров, Д.Ю. Усатый // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 4. – С. 50–54.

2. Хрисанов, В.И. Математическая модель асинхронных машин в фазных осях статора / В.И. Хрисанов // Электротехника. – 2004. – № 7. – С. 23–31.

3. Стригов, А.Д. Разработка электропри-

вода машины центробежного литья валков по системе ТПН–АД / А.Д. Стригов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков // Труды V международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (18–21 сентября 2007 г.) – Санкт-Петербург, 2007. – С. 347–350.

4. Синчук, О.Н. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, С.Л. Михайлов // Электротехника. – 2003. – № 3.

5. Масандилов, Л.Б. Особенности квазичастотного управления асинхронного двигателя / Л.Б. Масандилов, Ю.И. Гетман, В.Л. Мелихов // Электротехника. – 1994. – № 5–6. – С. 16–20.

6. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

Поступила в редакцию 11.01.2008 г.

Сарваров Анвар Сабулханович – доктор технических наук, профессор, декан факультета автоматизации и вычислительной техники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Sarvarov Anvar Sabulkhanovich. Doctor of technical sciences, professor, dean of the Automation and Computer Technique faculty of G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University.

Стригов Артем Дмитриевич – аспирант кафедры электроники и микроэлектроники ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Strigov Artyom Dmitrievich. Post-graduate student of the Electronics and Microelectronics department of G. I. Nosov Magnitogorsk State Technical University.

УПРАВЛЕНИЕ ТИРИСТОРНЫМИ ВОЗБУДИТЕЛЯМИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О.И. Осипов, В.В. Мельников, А.А. Оськин, К.Л. Куцый
г. Москва, МЭИ

CONTROL OF THYRISTOR ACTIVATORS OF HIGH-VOLTAGE SYNCHRONOUS MOTORS

O.I. Osipov, V.V. Melnikov, A.A. Oskin, C.L. Kutsii
Moscow, Moscow Power Institute

Представлены системы управления тиристорными возбудителями высоковольтных синхронных двигателей на примере модернизации нерегулируемых электроприводов насосных станций на их частотно-регулируемый синхронный электропривод.

Ключевые слова: машина центробежного литья валков, электропривод, тиристорный преобразователь напряжения, асинхронный двигатель.

Systems of control of thyristor activators of high-voltage synchronous motors by the example of conversion of uncontrollable electric drives of pump stations to their frequency-adjustable synchronous electric drive are presented.

Keywords: electric drive, synchronous electric motor, thyristor activator, control.

Модернизация нерегулируемых высоковольтных синхронных электроприводов насосных станций, как правило, связана с внедрением не только преобразователей частоты ПЧ, обеспечивающих регулирование скорости синхронных двигателей (СД), но и с заменой технически устаревших их возбудителей синхронных двигателей (ВСД) при сохранении ранее установленных электродвигателей. При этом требуется сохранять пуск и работу привода как в регулируемом, так и нерегулируемом их режимах за счет переключения питания статора СД либо на ПЧ, либо на промышленную сеть высокого напряжения. Отсюда ВСД должен обеспечивать асинхронный пуск СД при питании его от сети, частотный пуск и регулирование энергетических показателей привода при питании СД от ПЧ, а также режимы питания СД в процессе его переключения от ПЧ к питающей сети и обратно в соответствии с технологическими режимами насосной станции. Подобная многофункциональность работы ВСД налагает дополнительные требования к системам их управления и взаимосвязи между собой СД, ПЧ и ВСД.

Поскольку современные ПЧ имеют микропроцессорные системы управления, их согласование с ВСД требует полной замены устаревших ВСД с аналоговыми системами управления. Так при модернизации высоковольтных нерегулируемых синхронных приводов насосных станций «Чусовские очистные сооружения» 2-го подъёма (ЧОС-2) и «Большекамский водозабор» 2-го подъёма (БКВ-2) в г. Перми [1] все ранее работавшие

ВСД были заменены на нереверсивные тиристорные возбудители на основе преобразователей серии Simoreg DC Master с микропроцессорной системой управления, совместимой с интерфейсами современных ПЧ и контроллеров. В составе ВСД (рис. 1): главный контактор (ГК), ограничитель перенапряжений (ОПН), коммутационный дроссель (КД), выпрямительный мост (ВМ), тиристорный ключ (ТК) и разрядный резистор (РР). Выпрямленный ток с ВМ через контактные кольца ротора ККР синхронного двигателя подаётся в обмотку его возбуждения ОВСД. Силовые согласующие трансформаторы питания ВСД и аппараты максимально-токовой защиты возбудителя (на рис. 1 не отражены) при модернизации были сохранены. Питание статорных цепей СД ЧОС-2 и БКВ-2 осуществляется от высоковольтных многоячеечных преобразователей частоты серии Robicon Perfect Harmony, особенностью которых является синусоидальность выходного напряжения за счёт последовательного соединения нескольких низковольтных ПЧ с синфазными по основной гармонике напряжениями [1].

Функциональная схема алгоритма управления ВСД представлена на рис. 2. Здесь отмечены два управляющих воздействия: задание на ток возбуждения СД и команда на подключение резистора РР. Задание тока возбуждения формируется в функции режимов работы электропривода с питанием статора СД от ПЧ или от сети. При работе от ПЧ требуемая величина тока ротора вычисляется системой управления СУ ПЧ [2]. При работе от

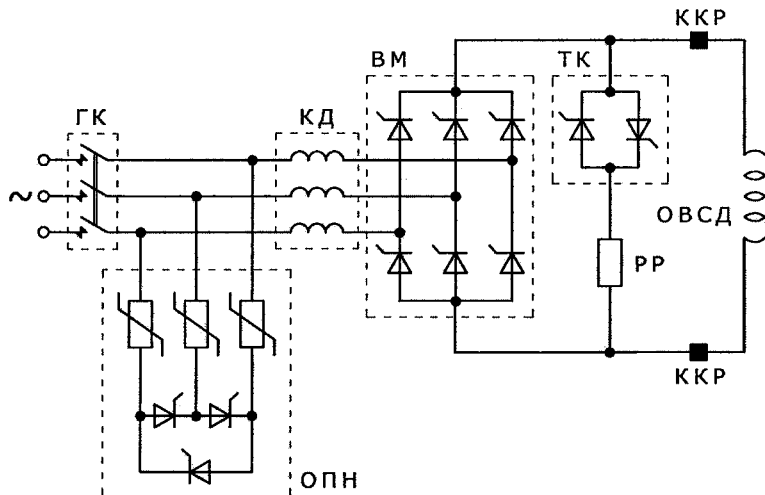


Рис. 1. Состав ВСД

сети задание тока возбуждения формируется системой управления ВСД на его свободных функциональных блоках.

При питании СД от сети задание тока возбуждения и команда на включение резистора РР от начала пуска до втягивания СД в синхронизм формируется в следующей последовательности. При пуске, когда скорость ротора находится в пределах от нуля до подсинхронной, узел прямого пуска (рис. 2) задаёт нулевой ток возбуждения и команду на включение резистора РР. При этом главный контактор ГК разомкнут и управляющие импульсы СИФУ выпрямительного моста ВМ заблокированы (указанные воздействия на рис. 2 не отражены). При достижении подсинхронной скорости узел прямого пуска отключает резистор РР от обмотки возбуждения СД. Далее разрешается подача управляющих импульсов СИФУ, включа-

ется контактор ГК и узлом прямого пуска формируется задание тока возбуждения СД, способствуя, тем самым, втягиванию ротора в синхронизм. Затем узел прямого пуска прекращает работу, а задание тока возбуждения начинает формироваться узлом поддержания требуемого $\cos \phi$.

При аварийных режимах в ВСД вступает в действие узел их анализа, отслеживающий состояние электропривода в реальном времени и имеющий приоритет в формировании управляющих воздействий. Так, в синхронном режиме при перегрузке и перегреве СД этот узел выдает предупреждение обслуживающему персоналу и формирует задание $\cos \phi = 1$, а при выпадении СД из синхронизма он отключает напряжение питания статора, включает резистор РР, задает нулевой ток возбуждения, блокирует СИФУ и отключает контактор ГК.

Описанные выше алгоритмы управления тех-

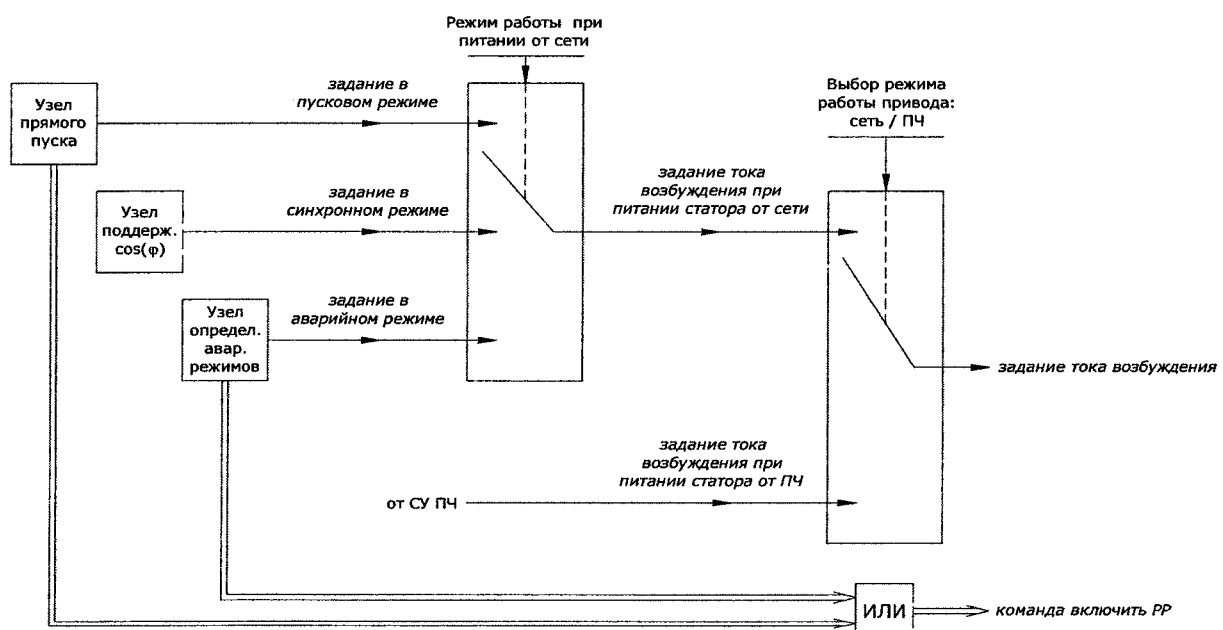


Рис. 2. Алгоритм управления ВСД

нически реализованы на свободных функциональных блоках программного обеспечения преобразователя Simoreg DC Master.

Работоспособность предложенной системы управления ВСД электроприводов насосных станций ЧОС-2 и БКВ-2 подтверждена экспериментальными исследованиями при различных режимах их работы. Так на рис. 3 представлены осциллограммы действующего значения тока статора (I_s , [A rms]) и мгновенного значения тока в обмотке возбуждения (i_f , [A inst]) синхронного двигателя серии СД2-85/57-6У3 (800 кВт, 6 кВ) при прямом асинхронном его пуске. При пуске задвижка на стороне нагнетания насоса была закрыта.

Асинхронный пуск СД происходил в 4 этапа используя параметры скольжения, тока статора, реактивной мощности двигателя, а также текущее значение напряжения ротора и времени. Возможность одновременного применения нескольких принципов пуска обусловлена тем, что система управления ВСД реализована на быстродействующей микропроцессорной технике. Такой подход гарантирует правильное поведение системы управления ВСД при различных режимах работы СД и технологического оборудования.

В начальный момент первого этапа асинхронного пуска в высоковольтном распределительном устройстве (РУ – 6кВ) включается вакуумный выключатель и на статор СД подаётся высокое напряжение. При этом ротор СД неподвижен и замкнут на низкоомный разрядный резистор РР (см. рис. 1). На первом этапе ротор СД разгоняется под действием асинхронного вращающего момента, обусловленного взаимодействием токов демпфер-

ной клетки ротора и токов обмотки статора. При достижении подсинхронной скорости вращения система управления ВСД отключает разрядный резистор от обмотки ротора СД, заканчивая первый этап асинхронного пуска СД.

Второй этап асинхронного пуска СД характеризуется устойчивым вращением ротора на подсинхронной скорости с разомкнутой обмоткой возбуждения. При этом система управления производит непрерывную диагностику режима работы СД по нескольким независимым критериям, в числе которых амплитуда и частота ЭДС, наводимой на зажимах ОВСД, величина тока статора и время с момента пуска. Целью диагностики является принятие решения о возможности и моменте подачи тока возбуждения в обмотку ротора СД.

Третий этап асинхронного пуска СД начинается с момента подачи тока возбуждения. Форма кривой тока возбуждения в начале этого этапа (рис. 3) существенно зависит от того, каким образом сориентированы полюса обмотки возбуждения относительно потока машины в момент подачи тока. Тем не менее, ни для СД, ни для ВСД, ни для технологического процесса нет никакой разницы, какова эта форма. Важным является то, что третий этап по своей сути является форсировкой возбуждения, предназначенной для гарантированного втягивания СД в синхронизм. Во время третьего этапа ВСД выполняет два действия: подаёт большой ток возбуждения и диагностирует втягивание СД в синхронизм. Третий этап – форсировка возбуждения – намеренно затянута и заканчивается с выдержкой времени после момента диагностирования синхронного вращения СД.

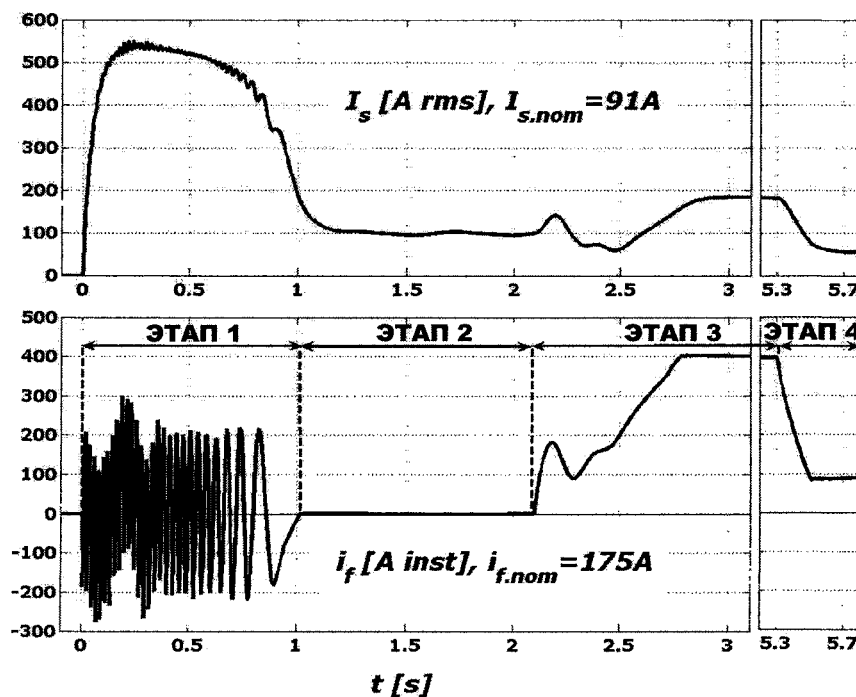


Рис. 3. Процесс прямого асинхронного пуска

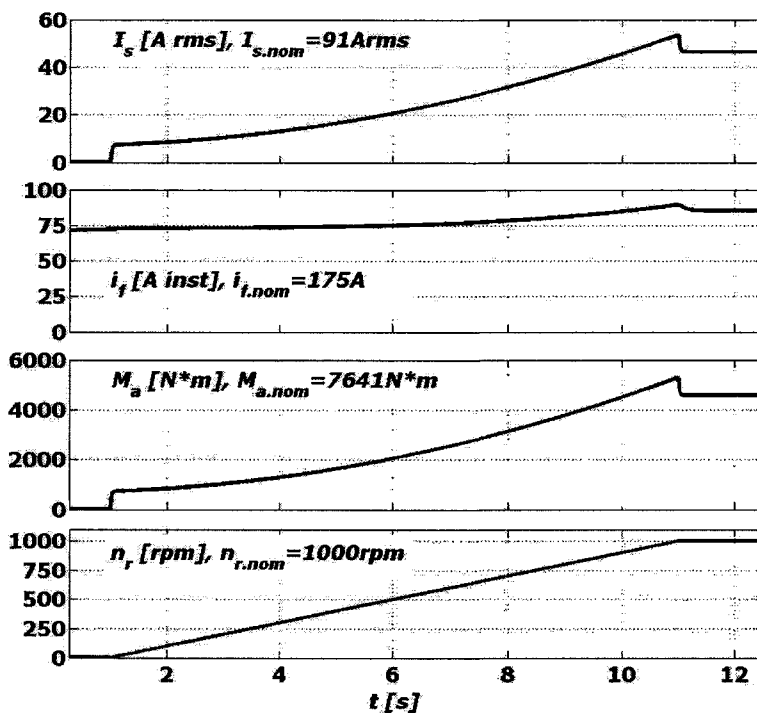


Рис. 4. Процесс частотного пуска

Четвёртый этап асинхронного пуска характеризуется синхронным вращением ротора СД и поддержанием системой управления ВСД заданного коэффициента мощности СД (на рис. 3 показан случай с поддержанием единичного коэффициента мощности). В сущности, четвёртый этап к асинхронному пуску не относится, поскольку является нормальным режимом работы СД при питании статора от сети.

Для сравнения пусковых режимов в нерегулируемом и регулируемом приводах на рис. 4 показаны осциллограммы частотного пуска того же насосного агрегата при аналогичных условиях.

Частотный пуск производился по задатчику интенсивности. Задание скорости изменялось от нуля до 1000 об/мин по линейному закону в течение 10 с. Фактическая скорость, частота напряжения и тока статора, как и амплитуда напряжения статора изменялись практически аналогично задающему сигналу.

При работе ВСД в составе частотно-регулируемого привода структура системы управления возбудителя существенно отличается от структуры, которая работает при питании статора от промышленной сети высокого напряжения. Управление и защиты СД при этом переносятся в ПЧ, а ВСД исполняет роль управляемого источника тока.

Разработанная система управления возбудителя ВТЭС при диагностике режимов работы и состояний СД использует одновременно несколько критериев и несколько доступных измерению координат, как в роторной, так и в статорной цепях

СД – т.е. использует информацию как с датчиков в шкафу управления ВСД, так и с датчиков в РУ-6 кВ. Это даёт гарантию правильного и своевременного определения аварийных режимов (выпадение из синхронизма и т.п.). Однако сложные и многочисленные алгоритмы диагностики в ряде случаев приводят к существенным перестраховкам в работе системы. Так, например, из рис. 3 видно, что на принятие решения о подаче тока возбуждения (этап 2 асинхронного пуска СД) система управления ВСД тратит времени больше, чем занимает собственно прямой пуск (этап 1 асинхронного пуска СД). При этом следует отметить, что время, затрачиваемое на этап 2, не является жестко детерминированной величиной и в зависимости от настроек системы управления, электромеханических свойств СД и характеристик механизма может варьироваться в пределах 1...7 секунд.

Особенность системы управления ВСД в возможности ее работы как при питании СД от сети, так и при его питании от ПЧ. Гибкость в перенастройке системы управления и ее согласовании с релейно-контакторной системой и блокировками в ранее действующих и сохраненных системах управления как низковольтной, так и высоковольтной частями синхронного электропривода насосных станций позволяют повысить надежность и оперативность модернизации подобных электроприводов. Опыт эксплуатации насосных агрегатов с СД и предложенной системы управления ВСД подтверждает их работоспособность СД как в нерегулируемых, так и в регулируемых электроприводах.

Литература

1. Мельников, В.В. Особенности применения многоячеечных преобразователей частоты в высоковольтных синхронных и асинхронных электроприводах / В.В. Мельников, А.А. Оськин,

К.Л. Куцкий // Труды МЭИ. «Электропривод и системы управления». – Вып. № 682. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – С. 34–45.

2. Blanc J.Y. Control, monitoring and protection of HV motors: Cahier Technique Merlin Gerin № 165. – P. 1–28. May 1995.

Поступила в редакцию 12.11.2007 г.

Осипов Олег Иванович. Доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода московского энергетического института (МЭИ), г. Москва. Область научных интересов – электромеханические системы, их диагностирование.

Osipov Oleg Ivanovich. Doctor of technical sciences, professor of the Automated Electric Drive department of Moscow Power Institute, Moscow. Scientific interests: electromechanical systems and their diagnosing.

Мельников Владимир Валерьевич. Аспирант кафедры автоматизированного электропривода МЭИ, г. Москва. Область научных интересов – электромеханические системы.

Melnikov Vladimir Valerievich. Post-graduate student of the Automated Electric Drive department of Moscow Power Institute, Moscow. Scientific interests: electromechanical systems.

Оськин Артем Анатольевич. Аспирант кафедры автоматизированного электропривода МЭИ, г. Москва. Область научных интересов – электромеханические системы.

Oskin Artem Anatolevich. Post-graduate student of the Automated Electric Drive department of Moscow Power Institute, Moscow. Scientific interests: electromechanical systems.

Куцкий Кирилл Леонидович. Аспирант кафедры автоматизированного электропривода МЭИ, г. Москва. Область научных интересов – электромеханические системы.

Kutsii Cyril Leonidovich. Post-graduate student of the Automated Electric Drive department of Moscow Power Institute, Moscow. Scientific interests: electromechanical systems.

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 28.10.2008. Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 6,56. Тираж 500 экз. Заказ 401/456.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.