



#5 (45), 2019 część 1

Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe

(Warszawa, Polska)

Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

Zespół redakcyjny

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

Rada naukowa

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

#5 (45), 2019 part 1

East European Scientific Journal

(Warsaw, Poland)

The journal is registered and published in Poland. The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

Editorial

Editor in chief - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

The scientific council

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

**Dawid Kowalik (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**
**Peter Clarkwood(University College
London)**
Igor Dziedzic (Polska Akademia Nauk)
**Alexander Klimek (Polska Akademia
Nauk)**
**Alexander Rogowski (Uniwersytet
Jagielloński)**
Kehan Schreiner(Hebrew University)
**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet
Warszawski)**
**Mateusz Marszałek (Uniwersytet
Jagielloński)**
**Szymon Matysiak (Polska Akademia
Nauk)**
**Michał Niewiadomski (Instytut
Stosunków Międzynarodowych)**
Redaktor naczelny - Adam Barczuk

1000 kopii.

**Wydrukowano w «Aleje Jerozolimskie
85/21, 02-001 Warszawa, Polska»**

**Wschodnioeuropejskie Czasopismo
Naukowe**

Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001
Warszawa, Polska

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

**Dawid Kowalik (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**
**Peter Clarkwood(University College
London)**
Igor Dziedzic (Polska Akademia Nauk)
**Alexander Klimek (Polska Akademia
Nauk)**
**Alexander Rogowski (Uniwersytet
Jagielloński)**
Kehan Schreiner(Hebrew University)
**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet
Warszawski)**
**Mateusz Marszałek (Uniwersytet
Jagielloński)**
**Szymon Matysiak (Polska Akademia
Nauk)**
**Michał Niewiadomski (Instytut
Stosunków Międzynarodowych)**
Editor in chief - Adam Barczuk

1000 copies.

**Printed in the "Jerozolimskie 85/21, 02-
001 Warsaw, Poland»**

East European Scientific Journal

Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Po-
land

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Antipova K.O., Davydenko Y.O., Kovalenko I.I., Shved A.V. MODELLING OF GROUP EXPERT JUDGMENTS UNDER CONDITIONS OF COMPLEX UNCERTAINTY	4
Доля Г. Н., Бондаренко К. А. МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕТОВОЗВРАЩЕНИИ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ МИКРОШАРИКОВ.	10
Будько В.І. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕМНОСТІ АКУМУЛЯТОРУ ВОДНЮ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ЯК ПЕРВИННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СКЛАДІ АВТОНОМНОЇ ЗАПРАВНОЇ СТАНЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ	21
Литвинова Е.И., Вареца В.В. АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ЧИСЕЛ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ КОДОВ ПО МЕТОДУ НАКОПЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТОВ	28
Васильев В.И., Васильев Е.В. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ	32
Erdenebat G. HAZARDS CONSTRUCTION OF NEW RAILWAYS IN MONGOLIA AND SOME PROTECTION PROPOSALS.....	44
Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю. ПРИРОДА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	49
Ермаков В.Ф., Власов М.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ В АВТОТРАНСФОРМАТОРЕ НА РАЙОННОЙ ПОДСТАНЦИИ А-20	54
Ермаков В.Ф., Морозов А.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА РАЙОННОЙ ПОДСТАНЦИИ АС-10	57
Ешбаева У., Джалилов А. ПЕЧАТНЫЕ СВОЙСТВА БУМАГ С ВВЕДЕНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ	63
Романов В.В., Животягин Д.А., Зимин Л.С. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «НАГРЕВ-ДЕФОРМАЦИЯ» ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ	69

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Antipova K.O.

*PhD candidate, lecturer of the Department of Software for Automation System,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding.*

Davydenko Y.O.

*Cand. Sc, associate professor of the Department of Software Engineering,
Petro Mohyla Black Sea National University.*

Kovalenko I.I.

*Dr. Sc., professor, professor of the Department of Software Engineering,
Petro Mohyla Black Sea National University.*

Shved A.V.

*Cand. Sc, associate professor of the Department of Software Engineering,
Petro Mohyla Black Sea National University.*

MODELLING OF GROUP EXPERT JUDGMENTS UNDER CONDITIONS OF COMPLEX UNCERTAINTY

Abstract: For decision making under uncertainty multicriteria decision methods are used to rank the alternatives based on the preferences expressed by experts. Decisions are often made on the basis of imprecise, uncertain and/or incomplete information provided by several sources, some of which may be unreliable. The paper offers implementation examples of the theory of plausible and paradoxical reasoning and the PCR5 rule for decisions making under conditions of complex uncertainties that are generated by arbitrary (contradictory) expert evidence. The mathematical models under consideration prevent errors and provide the greatest accuracy in processing the results of an expertise under conditions of multicriteria, multi-alternatives and complex uncertainties. The application of the classic combination rule and the PCR5 rule is used to deal with conflicting expert judgments of the Dezert-Smarandache model and the Dempster-Shafer model respectively.

Key words: DSmT, DST, frame of discernment, fusion, PCR5, uncertainty.

Problem statement. Effective results of group expert assessments analysis can be obtained with the suitable approach to pairwise comparison. The choosing of such an approach requires taking into account different forms of ignorance, i.e. situations where the necessary information is either missing or inadequate or presented in an inappropriate form. There are three common forms of ignorance: **incompleteness** – situations in which some data is unknown, but all available information is complete and correct; **inaccuracy** – a situation in which the reliability of data is certain, but the data itself is inaccurate; **uncertainty** – situations in which all available data is either true or false which can be estimated using probabilistic estimates.

In practice, different forms of ignorance, for instance, a combination of inaccuracy and uncertainty, occur rather often. Let's consider a situation where for a certain expertise the methods for obtaining and/or analyzing expert information were chosen unreasonably. This factor generates the inaccuracy of the received data. Also in the process of analyzing expert judgments the information about the experts' competence was not considered (or was not provided). This factor generates the uncertainty about the received data.

It is also necessary to take into account the fact that the obtained expert judgments (evidence) can interact with each other in different ways. Such pieces of evidence can be consistent

($\omega_1 \cap \omega_2 \cap \dots \cap \omega_n \neq \emptyset$), consonant

($\omega_1 \subseteq \omega_2 \subseteq \dots \subseteq \omega_n$), arbitrary

($\omega_1 \cap \omega_2 \cap \dots \cap \omega_i \cap \dots \cap \omega_n = \emptyset, \exists C : \omega_i \cap \omega_j \neq \emptyset$) or disjoint ($\omega_i \cap \omega_j = \emptyset$).

Therefore, an application of new theories and approaches for the analysis of such expert judgments is needed [10, p.43; 11, p.37; 13, p.24].

Review. Various methods of group expert evaluation are widely used in the process of alternatives selection in conditions of weakly structured or unstructured problems. Consequently, the task of obtaining generalized expert assessments may be the basis for formation of the recommendations for the decision maker. In this case, the main problem is the processing of conflicts, which refers to situations where focal elements (selected subsets or groups of expert evidence) do not intersect.

The main cause of conflicts between basic belief assignments is the inconsistency of individual groups of expert evidence. Unfortunately, the fusion rules based on conjunction consensus do not take into account the degree of intersection of the initial focal elements [12, p.170].

In this paper three theories are considered, that are dedicated to the modelling of complex uncertainties, characterized by the union and intersection as forms of experts' judgments interaction. They are as follows: Dempster-Shafer theory of evidence [1, p.150; 3, p.13; 7, p.3], Dezert-Smarandache theory of plausible and paradoxical reasoning [2, p.15; 5, p.11], conflict redistribution theory [6, p.24; 8, p.230].

The paper [8, p.207] provides information on how a number of combination methods handle conflicts. That can be summarized as follows:

- the Dempster fusion rule generally ignores the conflict and attributes any probability mass associated with conflict to the null set. The conflicting masses are used in the normalization process of the resulting masses;
- the Dezert-Smarandache classic fusion rule simply determines the combined probability masses for all possible sets of the initial focal elements, ignoring the nature of these intersections;
- in the DSm hybrid fusion rule, the transfer of partial conflicts (taking into account all integrity constraints of the model) is done directly onto the most specific sets including the partial conflicts but without proportional redistribution.

The rules of combination that are commonly used in the frameworks of DST and DSmT are as follows: the general Weighted Operator (WO), the Weighted Average Operator (WAO), minC rule, PCR1-PCR5 rules etc.

The basic idea of these rules is to redistribute total conflicting mass among the non-empty intersections of the initial focal elements. The main steps in applying all the rules of combination are as follows [6, p.2]:

- $X_j = \{\omega_i\}$ – an expert selected only one alternative $\omega_i \in \Omega$;
- $X_j = \{\omega_i \mid i = \overline{1, p}\}, p < n$ – an expert selected p alternatives $\omega_i \in \Omega$;
- $X_j = \Omega = \{\omega_i \mid i = \overline{1, n}\}$ – all alternatives are equivalent.

In real-life situations it is not always possible to correctly identify (distinguish) all or some elements of the frame of discernment (the condition of alternatives being mutually exclusive is not supported), in which case they can largely overlap one another. This is possible in a situation where the elements of the frame of discernment represent vague uncertain concepts, for instance, color palette, etc.

A new broader theory was needed to analyze such situations under conditions of uncertainty. Such a theory, created at the beginning of the 21st century, was called the theory of plausible and paradoxical reasoning (Dezert-Smarandache Theory – DSmT). In the DSmT

framework, a frame $\Omega = \{\omega_i \mid i = \overline{1, n}\}$ consists of a finite set of exhaustive hypotheses, which can potentially intersect. In the frame an expert can select subsets $X_i \subseteq D^\Omega, i = \overline{1, |D^\Omega|}$, which satisfy the following requirements:

- The above mentioned requirements (1);
- If $(X_i, X_j) \subset D^\Omega$, then $(X_i \cap X_j) \in D^\Omega$ and $(X_i \cup X_j) \in D^\Omega$.

Therefore, the results of an expert evaluation are used to form a system of subsets

- use the conjunctive rule to compute masses of non-empty sets of initial focal elements' intersections;
- compute the conflicting masses (partial and/or total);
- redistribute the conflicting masses to non-empty sets. This process differs for each of the PCR1-PCR5 rules.

The aim of the research is to consider the possibility of applying the theory of plausible and paradoxical reasoning and the theory of evidence for decision making under conditions of complex uncertainties that are generated by contradictory expert judgments.

Basic material and examples. Let

$\Omega = \{\omega_i \mid i = \overline{1, n}\}$ be a finite discrete set of exhaustive and exclusive elements (hypotheses) called elementary elements in DST. Ω has been called the frame of discernment of hypotheses or universe of discourse. An expert may select subsets $X_j \subseteq \Omega$,

$j = \overline{1, 2^{|\Omega|}}$ including the empty set \emptyset , where $2^{|\Omega|}$ is a cardinality of the power set. Any element of $2^{|\Omega|}$ is a composite event (disjunction) of the frame of discernment that satisfies the following requirements:

$$X = \{P_j \mid j = \overline{1, m}\}, \text{ which displays all experts' judgments } E = \{E_j \mid j = \overline{1, m}\}, \text{ where } P_j = \{X_i \mid i = \overline{1, p}\} \text{ – is a system of subsets, selected by a certain expert } E_j (p = |D^\Omega| - 1, X_i \subseteq D^\Omega).$$

$X = \{P_j \mid j = \overline{1, m}\}$, which displays all experts' judgments $E = \{E_j \mid j = \overline{1, m}\}$, where

$P_j = \{X_i \mid i = \overline{1, p}\}$ – is a system of subsets, selected by a certain expert $E_j (p = |D^\Omega| - 1, X_i \subseteq D^\Omega)$.

DSmT is based on so-called free DSm model. The exclusivity assumption between elements of Ω is not necessary within DSmT. However, in DSmT any integrity constraints between elements of Ω can also be introduced, if necessary, depending on the fusion problem under consideration. A free DSm model including some integrity constraints is called a hybrid DSm model. DSmT can deal also with the Shafer's model as well which appears actually only as a specific hybrid DSm model. The free model is formed on a set of all possible subsets of hyper-power set D^Ω .

For example, a frame of discernment $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ has $|D^\Omega| = 19$ possible subsets. Therefore, subsets $X_i \subseteq \Omega, i = \overline{0, 18}$ can

be formed based on one group of expert judgments. Experts assign *bbas* $m_i(X_i)$ to every X_i , which are combined using the DSm rule [5, p.16]:

$$m_{DS}(X) = \sum_{\substack{X_1, \dots, X_s \subset D^\Omega \\ X_1 \cap \dots \cap X_s = X}} \prod_{i=1}^s m_i(X_i).$$

This rule is also known as conjunctive consensus between *bbas* for $s \geq 2$ independent sources of evidence.

There are three basic functions in DST and DSmT:

- the basic belief assignment (*bba*) $m : \Lambda \rightarrow [0;1]$:

$$0 \leq m(X_i) \leq 1, \quad \forall (X_i \in \Lambda), \quad m(\emptyset) = 0, \quad \sum_{X_i \in \Lambda} m(X_i) = 1;$$

- the belief function $Bel : \Lambda \rightarrow [0;1]$:

$$Bel(B) = \sum_{X_i \subseteq B, X_i \in \Lambda} m(X_i);$$

- the plausibility function $Pl : \Lambda \rightarrow [0;1]$:

$$Pl(B) = \sum_{X_i \cap B \neq \emptyset, X_i \in \Lambda} m(X_i),$$

where Λ is a power set which equals 2^Ω for DST and D^Ω for DSmT.

The value of $m(X_i)$ expresses the proportion of all relevant and available evidence that supports the claim that a particular element of Ω belongs to the set $X_i \subseteq \Omega$ but to no particular subset of X_i . The value of $m(X_i)$ pertains only to the set X_i and makes no additional claims about any subsets of X_i .

$Bel(B)$ summarizes all our reasons to believe in B (i.e. the lower probability to believe in B). The plausibility $Pl(B)$ of B measures the total belief mass that can move into B (interpreted sometimes as the upper probability of B). Since $Bel(B)$ summarizes all our reasons to believe in B and $Pl(B)$ expresses how much we should believe in B if all currently unknown were to support B , the true belief in B is somewhere in the following interval:

$$[Bel(B), Pl(B)] \subseteq [0,1].$$

Thus, the above mentioned models that illustrate the various forms of group expert judgments can be sources of specific uncertainties. Therefore, the traditional probability theory cannot be used for their modelling.

The PCR rules redistribute partial conflicting masses differently. The PCR combination rules work for any degree of conflict, for any DSm models (Shafer's model, free DSm model or any hybrid DSm model). The sophistication, complexity and also correctness of proportional conflict redistribution increases from the first PCR1 rule up to the last rule PCR5 [6, p.12].

Let's Ω be the frame of the fusion problem under consideration with two focal elements X_1 and X_2 , and belief assignments: $m_1(X_1)$, $m_2(X_1)$, $m_1(X_2)$, $m_2(X_2)$. The focal elements are involved in a conflict, i.e. $X_1 \cap X_2 = \emptyset$. The conjunctive consensus is calculated as follows:

$$m(X_1 \cap X_2) = m_1(X_1) * m_2(X_2) + m_2(X_1) * m_1(X_2).$$

The PCR5 rule is based on the redistribution of the partial conflicting mass proportionally on non-empty sets involved in the conflict: $m(X_1 \cap X_2) : x = m_1(X_1) * m_2(X_2)$, $y = m_2(X_1) * m_1(X_2)$. The conflicting mass x is redistributed to X_1 and X_2 proportionally with the masses $m_1(X_1)$ and $m_2(X_2)$ assigned to X_1 and X_2 respectively, the conflicting mass y is redistributed proportionally with the masses $m_2(X_1)$ and $m_1(X_2)$ assigned to X_1 and X_2 respectively.

For the fusion of $s=2$ sources the PCR5 is defined by [8, p.264]:

$$m_{PCR5}(X_1) = m(X_1) + \sum \left[\frac{m_1(X_1) * m_2(X_2)}{m_1(X_1) + m_2(X_2)} + \frac{m_2(X_1) * m_1(X_2)}{m_2(X_1) + m_1(X_2)} \right],$$

where $m(X_1)$ is a combined conflict mass of X_1 , calculated on the basis of conjunctive consensus.

Example 1. To illustrate DSmT, let us consider a brief example. There is a frame of discernment $\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}$ and a free DSm model:

The main disadvantage of the free model is that even with $n \leq 4$ elements of the frame of discernment, the calculations are very complicated. However, real-world tasks are characterized by much smaller number of alternatives than the number of all possible subsets D^Ω . Hence, the authors of the theory proposed a hybrid model, which is formed on the assumption of introducing restrictions on various elements of the free model.

$$X_0 = \emptyset, \quad X_1 = \omega_1, \quad X_2 = \omega_2, \quad X_3 = \omega_1 \cap \omega_2, \quad X_4 = \omega_1 \cup \omega_2$$

with associated *bbas*:

$$m_1(\omega_1) = 0,45; \quad m_1(\omega_2) = 0,3; \quad m_1(\omega_1 \cap \omega_2) = 0,1; \quad m_1(\omega_1 \cup \omega_2) = 0,15;$$

$$m_2(\omega_1) = 0,15; \quad m_2(\omega_2) = 0,35; \quad m_2(\omega_1 \cap \omega_2) = 0,4; \quad m_2(\omega_1 \cup \omega_2) = 0,1;$$

$$m_3(\omega_1) = 0,25; \quad m_3(\omega_2) = 0,2; \quad m_3(\omega_1 \cap \omega_2) = 0,2; \quad m_3(\omega_1 \cup \omega_2) = 0,35.$$

These masses are to be combined using the Dezert-Smarandache rule. All the combined subsets of the focal elements' intersections are presented in the table 1.

Table 1.

Non-empty sets of the three sources example

$C_1 C_2 \backslash C_3$	ω_1	ω_2	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$\omega_1 \cap \omega_1$	ω_1	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	ω_1
$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$\omega_1 \cap \omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$\omega_1 \cap (\omega_1 \cup \omega_2)$	ω_1	$\omega_1 \cup \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$	ω_1
$\omega_2 \cap \omega_1$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$\omega_2 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	ω_2	$\omega_1 \cap \omega_2$	ω_2
$\omega_2 \cap \omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$\omega_2 \cap (\omega_1 \cup \omega_2)$	$\omega_1 \cup \omega_2$	ω_2	$\omega_1 \cup \omega_2$	ω_2
$\omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_1$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$\omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$\omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$\omega_1 \cap \omega_2 \cap (\omega_1 \cup \omega_2)$	$\omega_1 \cup \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$(\omega_1 \cup \omega_2) \cap \omega_1$	ω_1	$\omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$	ω_1
$(\omega_1 \cup \omega_2) \cap \omega_2$	$\omega_1 \cap \omega_2$	ω_2	$\omega_1 \cup \omega_2$	ω_2
$(\omega_1 \cup \omega_2) \cap \omega_1 \cap \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$
$(\omega_1 \cup \omega_2) \cap (\omega_1 \cup \omega_2)$	ω_1	ω_2	$\omega_1 \cup \omega_2$	$\omega_1 \cup \omega_2$

The calculated generalized *bbas* of expert evidence are as follows:

$$m_{DS}(\omega_1) = m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_1) + m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_1 \cup \omega_2) + m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) * m_3(\omega_1) + m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) * m_3(\omega_1 \cup \omega_2) + m_1(\omega_1 \cup \omega_2) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_1) + m_1(\omega_1 \cup \omega_2) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_1 \cup \omega_2) + m_1(\omega_1 \cup \omega_2) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) * m_3(\omega_1) = 0,085;$$

$$m_{DS}(\omega_2) = m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_2) + m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_1 \cup \omega_2) + m_1(\omega_2) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) * m_3(\omega_2) + m_1(\omega_2) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) * m_3(\omega_1 \cup \omega_2) + m_1(\omega_1 \cup \omega_2) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_2) + m_1(\omega_1 \cup \omega_2) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_1 \cup \omega_2) + m_1(\omega_1 \cup \omega_2) * m_2(\omega_1 \cup \omega_2) * m_3(\omega_2) = 0,106;$$

$$m_{DS}(\omega_1 \cap \omega_2) = 0,477;$$

$$m_{DS}(\omega_1 \cup \omega_2) = 0,332.$$

The calculated results indicate that the best alternative is intersection of the elements ω_1 and ω_2 with the *bba* that equals 0,477.

Example 2. For the next example let us consider the frame of discernment $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$, Shafer's model, and the 3 following *bbas*:

$$\begin{aligned}
 m_1(\omega_1) &= 0,15; & m_1(\omega_2) &= 0,55; & m_1(\omega_3) &= 0,3; \\
 m_2(\omega_1) &= 0,45; & m_2(\omega_2) &= 0,35; & m_2(\omega_3) &= 0,2; \\
 m_3(\omega_1) &= 0,25; & m_3(\omega_2) &= 0,4; & m_3(\omega_3) &= 0,35.
 \end{aligned}$$

Fusion of the non-empty sets *bbas* of the initial focal elements yields:

$$\begin{aligned}
 m(\omega_1) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_1) = 0,15 * 0,45 * 0,25 = 0,017, \\
 m(\omega_2) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_2) = 0,55 * 0,35 * 0,4 = 0,077, \\
 m(\omega_3) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_3) = 0,3 * 0,2 * 0,35 = 0,021
 \end{aligned}$$

with conflicting mass $k = 0,885$, therefore PCR5 rule is to be used.

The conflicting masses are:

$$\begin{aligned}
 m(\omega_1 \cap \omega_1 \cap \omega_2) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_2) = 0,027; \\
 m(\omega_1 \cap \omega_1 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_3) = 0,024; \\
 m(\omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_1) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_1) = 0,013; \\
 m(\omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_2) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_2) = 0,021; \\
 m(\omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_3) = 0,01838 \\
 m(\omega_1 \cap \omega_3 \cap \omega_1) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_1) = 0,0075; \\
 m(\omega_1 \cap \omega_3 \cap \omega_2) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_2) = 0,012; \\
 m(\omega_1 \cap \omega_3 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_1) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_3) = 0,0105; \\
 m(\omega_2 \cap \omega_1 \cap \omega_1) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_1) = 0,062; \\
 m(\omega_2 \cap \omega_1 \cap \omega_2) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_2) = 0,099; \\
 m(\omega_2 \cap \omega_1 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_3) = 0,0866; \\
 m(\omega_2 \cap \omega_2 \cap \omega_1) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_1) = 0,048; \\
 m(\omega_2 \cap \omega_2 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_3) = 0,0674; \\
 m(\omega_2 \cap \omega_3 \cap \omega_1) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_1) = 0,0275; \\
 m(\omega_2 \cap \omega_3 \cap \omega_2) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_2) = 0,044; \\
 m(\omega_2 \cap \omega_3 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_3) = 0,0385; \\
 m(\omega_3 \cap \omega_1 \cap \omega_1) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_1) = 0,03375; \\
 m(\omega_3 \cap \omega_1 \cap \omega_2) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_2) = 0,054; \\
 m(\omega_3 \cap \omega_1 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_3) = 0,04725; \\
 m(\omega_3 \cap \omega_2 \cap \omega_1) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_1) = 0,02625; \\
 m(\omega_3 \cap \omega_2 \cap \omega_2) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_2) = 0,042; \\
 m(\omega_3 \cap \omega_2 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_3) = 0,03675; \\
 m(\omega_3 \cap \omega_3 \cap \omega_1) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_1) = 0,015; \\
 m(\omega_3 \cap \omega_3 \cap \omega_2) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_3) * m_3(\omega_2) = 0,024.
 \end{aligned}$$

The first local conflict $m(\omega_1 \cap \omega_1 \cap \omega_2) = m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_2) = 0,15 * 0,45 * 0,4 = 0,027$ is proportionally redistributed between alternatives ω_1 and ω_2 :

$$\frac{x_1}{0,15 * 0,45} = \frac{y_1}{0,4} = \frac{0,15 * 0,45 * 0,4}{0,15 * 0,45 + 0,4}$$

Thus, $x_1 = 0,0039$; $y_1 = 0,0231$.

The second local conflict $m(\omega_1 \cap \omega_1 \cap \omega_3) = m_1(\omega_1) * m_2(\omega_1) * m_3(\omega_3) = 0,15 * 0,45 * 0,35 = 0,024$ is proportionally redistributed between alternatives ω_1 and ω_3 :

$$\frac{x_2}{0,15 * 0,45} = \frac{z_1}{0,35} = \frac{0,15 * 0,45 * 0,35}{0,15 * 0,45 + 0,35}$$

Thus, $x_2 = 0,00382$; $z_1 = 0,01981$.

The local conflict $m(\omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_3) = m_1(\omega_1) * m_2(\omega_2) * m_3(\omega_3) = 0,15 * 0,35 * 0,35 = 0,0184$ is proportionally redistributed between alternatives ω_1 , ω_2 and ω_3 :

$$\frac{x_5}{0,15} = \frac{y_4}{0,35} = \frac{z_2}{0,35} = \frac{0,15 * 0,35 * 0,35}{0,15 + 0,35 + 0,35}$$

Thus, $x_5 = 0,00324$; $y_4 = 0,00757$; $z_2 = 0,00757$.

Adding all corresponding masses, one gets the final result for ω_1 , ω_2 and ω_3 :

$$m_{PCR5}(\omega_1) = m(\omega_1) + x_1 + \dots + x_{18} = 0,01688 + 0,0039 + 0,00382 + 0,00127 + 0,01086 + 0,00324 + 0,00118 + 0,0024 + 0,00716 + 0,01051 + 0,06649 + 0,02888 + 0,02719 + 0,00688 + 0,0092 + 0,02113 + 0,03831 + 0,00729 + 0,0121 = 0,27868$$

$$m_{PCR5}(\omega_3) = m(\omega_3) + z_1 + \dots + z_{18} = 0,021 + 0,01981 + 0,00757 + 0,00632 + 0,0032 + 0,00334 + 0,02246 + 0,04347 + 0,0055 + 0,02095 + 0,00435 + 0,02455 + 0,01409 + 0,00894 + 0,00875 + 0,02864 + 0,00848 + 0,0029 + 0,00313 = 0,25743$$

$$m_{PCR5}(\omega_2) = m(\omega_2) + y_1 + \dots + y_{18} = 0,077 + 0,0231 + 0,01185 + 0,01014 + 0,00757 + 0,0064 + 0,05137 + 0,03251 + 0,03529 + 0,02094 + 0,02391 + 0,01513 + 0,02305 + 0,03415 + 0,01878 + 0,01021 + 0,01336 + 0,02827 + 0,02087 = 0,46389$$

In this example, the initial level of experts' support regarding subset ω_3 on the frame of discernment $\Omega(m(\omega_1) = 0,017 \quad m(\omega_2) = 0,077 \quad m(\omega_3) = 0,021)$ after the redistribution of conflict became even more pronounced.

Conclusion. This paper offers two examples of combination rules implementation. The differences between DSm and PCR5 rules lie in how they process the conflicting mass of empty sets. The classic DSm rule allocates these masses to the intersection of the corresponding focal elements. If the initial focal elements do not intersect, then the combined mass is allocated to both focal elements without any other assumptions. The general principle of the PCR5 rule is to redistribute the conflicting mass proportionally on non-empty sets involved in the model according to all integrity constraints. Thus, the PCR5 rule does the most accurate redistribution of partial conflict masses. It should also be

noted that both the DSm and the PCR5 rules are hard to implement because they require a large amount of computation, especially in cases with more than two groups of evidence. However, the appropriate software makes such a disadvantage less significant. Perspective for further research is to consider presenting the task of searching and selecting multicriteria alternatives as the task of choosing the optimal organizational structures of complex organizational systems of large enterprises.

References

1. Beynon, M.J. DS/AHP method; a mathematical analysis, including an understanding of uncertainty [Text] / M.J. Beynon // European Journal of Operational Research, 2002. – vol.140. – pp. 148-164.
2. Dezert, J. Foundations for a new theory of plausible and paradoxical reasoning [Text] / J. Dezert // Information and Security Journal, Semerdjiev Ed., Bulg. Acad. Of Sc., Vol. 9, 2002.
3. Sentz, K. Combination of evidence in Dempster-Shafer Theory [Virtual Resource] / Karl Sentz, Scott Ferson // Sandia National Laboratories, 2002. – 96 p. – Access Mode: prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2002/ 020835.pdf. – Date of Access: 29.02.2016.
4. Shafer, G. A mathematical theory of evidence [Text] / G. Shafer. – Princeton University Press, 1976. – 297 p.
5. Smarandache, F. Advances and applications of DSmT for information fusion [Text] / F. Smarandache, J. Dezert // Rehoboth: American Research Press. – 2006. – vol.2. – 461 pp.
6. Smarandache, F. Proportional conflict redistribution rules for information fusion [Text] / Florentin Smarandache, Jean Dezert // American Research Press, 2006. – vol.2. – 41 p.
7. Smets, Ph. Analyzing the combination of conflicting belief functions [Virtual Resource] / Philippe Smets // Universite' Libre de Bruxelles, 2005. – 39 pp.
- Access Mode: iridia.ulb.ac.be/~psmets/Combi_Confl.pdf. – Date of Access: 29.02.2016.
8. Uzga-Rebrovs, O. Nenoteiktiby parvaldisana / O. Uzga-Rebrovs. – Resekne: RA Izdevnieciba, 2010. – vol.3 – 560 pp.
9. Zhang, L. Advances in the Dempster-Shafer theory of evidence [Text] / Lianwen Zhang // New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994. – P. 51-69.
10. Валькман, Ю.Р. Моделирование НЕ-факторов – основа интеллектуализации компьютерных технологий / Ю.Р. Валькман, В.С. Быков, А.Ю. Рыхальский // Систем. дослідж. та інформ. технології. — 2007. — № 1. — С. 39-61.
11. Душкин, Р.В. Об одном подходе к автоматизированному извлечению, представлению и обработке знаний с НЕ-факторами/ Р.В. Душкин, Г.В. Рыбина // Известия РАН Теория и системы управления. – 1999. – №5. — С. 34-44.
12. Коваленко, И.И. Методы качественного анализа в задачах судостроения, судоремонта и судоходства: учебное пособие [Текст] / И.И. Коваленко, Т.В. Пономаренко, А.В. Швед и др. — Николаев: Илион, 2014. — 220 с.
13. Коваленко, И.И. Некоторые НЕ-факторы и методы их моделирования / И.И. Коваленко, А.В. Швед // Вісник ХНТУ. — Херсон, 2013. — №1(46). — С.23-27.

Dolya Gregory

*professor, Department of Theoretical and Applied Systems Engineering,
Faculty of Computer Science, V.N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine.
(ORCID: 0000-0001-8888-5189)*

Kostiantyn Bondarenko

*student, Department of Systems and Technologies Modeling,
Faculty of Computer Science, V.N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine.
(ORCID: 0000-0002-2430-0716)*

MODEL OF LASER RADIATION TRANSFORMATION UPON RETROREFLECTION FROM GLASS BEADS BASED SURFACE

Доля Г. Н.

*профессор, кафедра Теоретической и прикладной системотехники,
факультет компьютерных наук,
Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Харьков, Украина.*

Бондаренко К. А.

*студент, кафедра Моделирования систем и технологий, факультет компьютерных наук,
Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Харьков, Украина.*

МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕТОВОЗВРАЩЕНИИ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ МИКРОШАРИКОВ.

Summary: The features of retroreflective surfaces based on microspheres are considered. A computer simulation model of laser radiation transformation on such retroreflectors was developed. A mathematical model is described. Simulation results are presented. Prospects for the use of the developed model are outlined.

Аннотация: Рассмотрены особенности световозвращающих поверхностей на основе микрошариков. Разработана компьютерная имитационная модель трансформации лазерного излучения на такого рода ретрорефлекторах. Описана математическая модель. Представлены частные результаты моделирования. Очерчены перспективы использования разработанной модели.

Keywords: lasers, retroreflective surfaces, micro glass beads, simulation modeling, speclometry.

Ключевые слова: лазеры, ретрорефлекторные поверхности, микростеклошарики, имитационное моделирование, спеклометрия.

Вступление

В настоящее время большое распространение получили лазерные сенсоры. Основанные на детектировании отраженного лазерного излучения от подсвеченного объекта, эти приборы позволяют решать задачи виброконтроля, лазерной локации и велосиметрии [1, 2]. Одними из ключевых параметров таких систем являются мощность и отношение сигнал/шум детектируемого отраженного от цели излучения. Повысить мощность отраженного в сторону приемника света позволяют ретрорефлективные поверхности, нанесенные на наблюдаемый объект. Такие поверхности представляют собой набор миниатюрных рефлекторов (призм или шариков (МШ)), нанесенных на некоторую основу (пластик, краска и т.п.) [3]. Благодаря отражательным свойствам, световозвращающие поверхности (СВП), в частности, нашли широкое применение при прокладке дорожной разметки и изготовлении знаков.

Помимо того, что ретрорефлекторы позволяют значительно увеличить мощность принимаемого сигнала, они также формируют в дальней зоне определенную спекл-картину, будучи подсвеченными монохроматическим лазером. Это делает такого рода поверхности чрезвычайно интересными в применении к лазерной локации [4, 5, 6]. Актуальной проблемой является исследование ретрорефлекторных поверхностей на основе микрошариков с целью оптимизации их структуры для успешного применения оных в прикладных целях [7]. Решение этой задачи требует анализа трансформации лазерного излучения на СВП МШ, что стало возможно благодаря созданной имитационной модели, которая описана в данной работе.

Методы описания трансформации лазерного излучения на СВП МШ

В рамках теории дифракции, любая задача дифракции электромагнитных волн, представляющих свет, на неких телах сводится к нахождению решения волнового уравнения с учетом граничных условий [8]. Однако, даже для простейших тел, такое решение искать достаточно сложно, и имеет смысл делать это лишь в случаях, когда длина волны сравнима с размерами тела.

Ввиду того, что фактические размеры шариков соответствуют 50 мкм в диаметре и более, а длина волны, к примеру, зеленого лазера составляет всего 0,53 мкм, можно применить приближение геометрической оптики для расчетов трансформации поля внутри единичного микрошарика.

Моделирование трансформации поля на СВП МШ

В разработанной модели СВП полагается двумя параллелепипедами с общей стороной, расположенным в пространстве. Они представляют покрывающий слой и подложку, оба слоя диэлектрики. Между параллелепипедами заключены шарики. Последние в данной модели считаются идеальными сферами из диэлектрика, с заданным радиусом, а также центром для каждой из них. Излучатель представлен как гауссов пучок однодогового поляризованного монохроматического лазера, расположение которого задается произвольно в пространстве. Рефлектор и излучатель предполагаются размещенными в некоторой изотропной среде.

Результатом моделирования является получение распределения интенсивности отраженного от СВП излучения в дальней зоне. Для этого необходимо вначале смоделировать преобразование амплитудно-фазового распределения (далее АФР) поля на СВП, после чего над полученным на поверхности СВП АФР сделать преобразование Фурье.

Моделирование преобразования светового излучения на СВП МШ происходит для каждой из дискретных точек на поверхности СВП путем трассировки и разбито на три основных этапа.

Этап первый. Поиск входного АФР на поверхности СВП.

Переход от дискретной точки к точке в пространстве

Как было оговорено выше, СВП предполагается как некий параллелепипед, составленный из двух с общей гранью. Это означает, что искать АФР мы будем на плоскости – на одной из граней. Подложка же предполагается достаточно толстой, что бы ни один из шариков не выходил за ее пределы и отдельно ее толщина не указывается, так как это не влияет на моделирование.

Лицевая плоскость рефлектора задается тремя точками M_1, M_2, M_3 , при этом лицевой стороной принято считать ту, для которой вектор нормали к плоскости $\vec{n} = \overline{M_1M_3} \times \overline{M_1M_2}$ направлен в сторону наблюдателя.

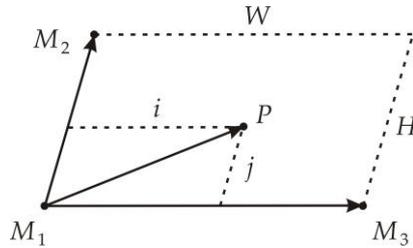


Рис. 1. Переход к точке на плоскости

Частота дискретизации определяет количество точек, для которых будет выполнена трассировка. Вводится она как W - количество точек на модуль вектора $\overline{M_1M_3}$. Внутри модели будет рассчитано количество точек, назовем его H , для $\overline{M_1M_2}$ так, что равенство $W / |\overline{M_1M_3}| = H / |\overline{M_1M_2}|$ верно. На первом этапе на плоскости СВП выбирается дискретная точка $(m, n): m \in [0, 1, 2, \dots, W-1]; n \in [0, 1, 2, \dots, H-1]$. Она преобразуется в точку в пространстве $P(x, y, z)$, для которой будут рассчитаны параметры поля излучателя. Для этого достаточно рассчитать ее радиус-вектор \vec{r}_p (рис. 1.):

$$\vec{r}_p = \vec{r}_{M_1} + \frac{m}{W} \overline{M_1M_3} + \frac{n}{H} \overline{M_1M_2}$$

Расчет параметров генерируемого лазером поля в точке

Зная координаты точки P , можно переходить к расчету поля. В качестве источника предполагается одномодовый монохроматический лазер, генерирующий поляризованную волну. Излучение такого лазера можно описать гауссовым пучком, для чего обратимся к работам Когельника и Ли [9], а также Маркузе [10], и запишем поле в комплексной форме, где реальная часть описывает амплитуду, а мнимая – фазу в точке

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left\{-\left(\frac{r}{w(z)}\right)^2\right\} \exp\left\{-i\left[kz + \frac{kr^2}{2R(z)} - \arctg\left(\frac{2z}{kw_0^2}\right)\right]\right\},$$

где

r - расстояние от точки до оси пучка;

z - расстояние от точки до плоскости перетяжки пучка;

E_0 - амплитуда поля на перетяжке пучка;

w_0 - полуширина пучка в перетяжке;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число;

$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{2z}{kw_0^2}\right)^2}$ - полуширина пучка на расстоянии z от перетяжки;

$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{kw_0^2}{2z}\right)^2\right]$ - радиус кривизны сферического волнового фронта на расстоянии z .

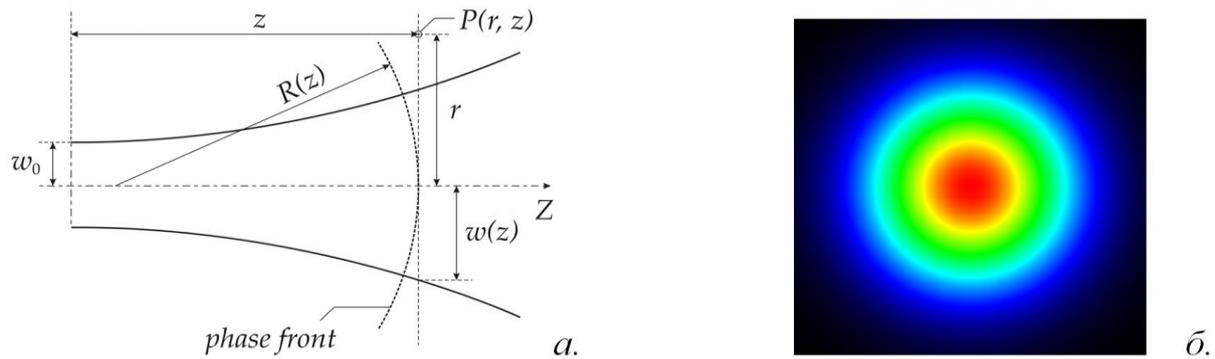


Рис. 2. Гауссов пучок: а) к описанию мат. модели б) смоделированное сечение

Из вышеописанного и иллюстрации (рис. 2.а.) явствует, что удобнее всего воспользоваться цилиндрической системой координат, однако, ввиду осевой симметрии пучка, для нахождения амплитуды и фазы достаточно всего лишь параметров r и z для точки P .

Предлагается следующий подход к позиционированию в пространстве: плоскость, в которой лежит перетяжка пучка, задается тремя точками M_4, M_5, M_6 , такими, что M_4 совпадает с центром перетяжки, M_5 и M_6 , выбраны так, что скалярное произведение векторов $\overline{M_4M_6}$ и $\overline{M_4M_5}$ не нулевое. Далее полагается, что векторное произведение $\overline{z_G} = \overline{M_4M_6} \times \overline{M_4M_5}$ указывает положительное направление оси пучка. Амплитуда же задается как две скалярные величины A_1, A_2 . Далее происходит приведение к единичным векторам и в итоге имеем некий базис $\overline{x_G}, \overline{y_G}, \overline{z_G}$. Вектор поляризации \overline{E} рассчитывается внутри модели путем сложения единичных векторов $\overline{x_G}, \overline{y_G}$, умноженных на коэффициенты A_1, A_2 соответственно. Столь неочевидная форма записи параметров амплитуды позволяет легко менять поляризацию пучка. Наконец, задается полуширина пучка в плоскости перетяжки w_0 и длина волны излучателя в вакууме λ .

Зная базис, связанный с пучком, можно записать матрицу перехода T :

$$T = \begin{pmatrix} x_{x_G} & x_{y_G} & x_{z_G} \\ y_{x_G} & y_{y_G} & y_{z_G} \\ z_{x_G} & z_{y_G} & z_{z_G} \end{pmatrix}.$$

Для получения координат точки P в новом базисе достаточно построить вектор $\overline{M_4P}$, тогда радиус-вектор точки в новом базисе $\overline{r_{PG}}$ может быть найден как:

$$\overline{r_{PG}} = T^{-1} \overline{M_4P}.$$

Для перехода к цилиндрическим координатам остается лишь найти расстояние $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ от оси пучка z .

Для предельного перехода к геометрической оптике, необходимо рассчитать направляющий (волновой) вектор поля в точке. Для этого найдем нормаль \overline{CP} к волновому фронту пучка в точке P (рис. 3.).

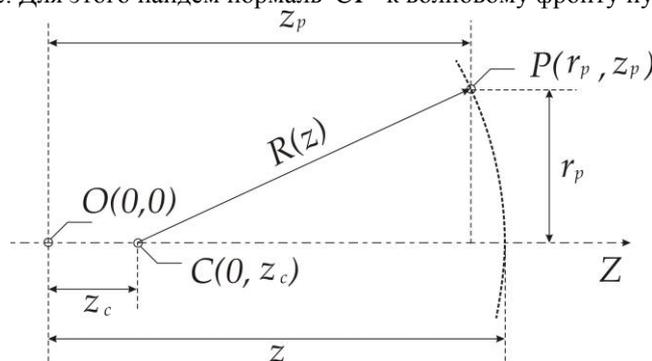


Рис. 3. Переход от гауссова пучка к геометрической оптике

В случае, когда P лежит на оси пучка ($r_p = 0$), или на перетяжке ($z_p = 0$), \overline{CP} определён как нормаль к плоскости перетяжки, для всех прочих случаев запишем

$$\begin{cases} |\overline{CP}| = R(z) \\ |\overline{CP}| = \sqrt{r_p^2 + (z_p - z_c)^2} \\ z_c = z - R(z) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R^2(z) = r_p^2 + (z_p - z + R(z))^2 \\ z^3 + \left(2 \left(\frac{kw_0^2}{2} \right)^2 - z_p^2 - r_p^2 \right) z - z_p 2 \left(\frac{kw_0^2}{2} \right)^2 = 0 \end{cases}$$

Найдя действительный корень полученного неполного кубического уравнения, рассчитываем z_c , что определяет точку C .

Определив нормаль к волновому фронту \overline{CP} , суть получаем направляющий вектор \vec{k} для поля в точке P . Далее остается лишь восстановить вектор электрического поля \vec{E} с помощью простого последовательного применения векторного произведения и необходимой нормировки так, что вектора \vec{E} , \vec{E}_0 и \vec{k} лежат в одной плоскости, \vec{E} и \vec{k} перпендикулярны.

На рис. 2.б. представлено распределение интенсивности в сечении пучка, смоделированное в соответствии с приведенными выше соотношениями. Изменяя параметр w_0 можно варьировать эффективный диаметр пучка, а значит и количество освещенных МШ.

Этап второй. Преобразование поля внутри СВП.

Расчет траектории луча внутри СВП.

Первым шагом на пути решения этой задачи является расчет преломления луча на границе раздела сред. Лучи естественно описывать точкой в пространстве и направляющим вектором. Вполне очевидно, что исходный и преломленный луч имеют общую точку, а также то, что направляющие вектора обоих лучей и нормаль к плоскости раздела сред компланарны.

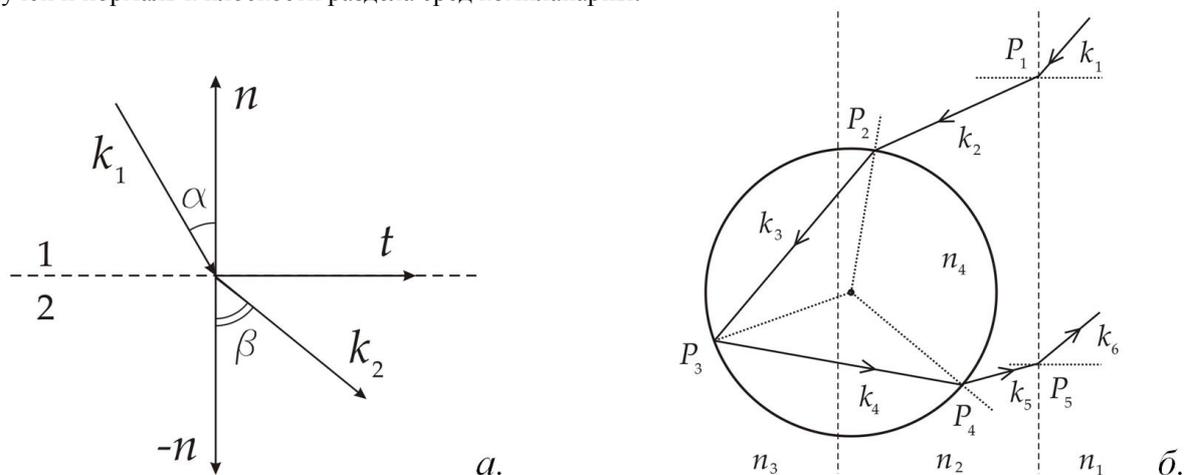


Рис. 4. а) Преломление луча на границе сред б) Переотражение луча в МШ

Чтобы найти вектор преломленного луча \vec{k}_2 , рассчитаем угол между направляющим вектором падающего луча \vec{k}_1 и нормалью к разделу сред \vec{n} (рис. 4.а.). Для удобства будущих вычислений будем работать с вектором $-\vec{n}$:

$$\alpha = \arccos(-\vec{n} \cdot \vec{k}_1)$$

Если $\alpha > \frac{\pi}{2}$, то СВП освещена со стороны подложки (тыльной стороны) и вычисления производить далее бессмысленно. Если угол нулевой, значит падение нормальное, и тогда вектор \vec{k}_2 совпадает с \vec{k}_1 . В противном случае необходимо убедиться, что найденный угол меньше, чем угол полного внутреннего отражения (ПВО). Если же угол падения все же меньше, чем угол ПВО, то следует рассчитать угол β . Для этого воспользуемся формулой Снеллиуса:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)$$

Далее необходимо рассчитать \vec{k}_2 так, что бы он лежал в одной плоскости с \vec{k}_1 и \vec{n} . Используя векторное произведение, получим \vec{t} :

$$\vec{t} = (\vec{n} \times \vec{k}_1) \times \vec{n}$$

Так как угол β уже известен, а вектора \vec{t} и $-\vec{n}$ перпендикулярны, то \vec{k}_2 можно представить как:

$$\vec{k}_2 = -\vec{n} \frac{\cos \beta}{|-\vec{n}|} + \vec{t} \frac{\sin \beta}{|\vec{t}|}$$

Итак, преломленный луч теперь может быть описан ранее найденной точкой (будем именовать ее далее P_1) и вектором \vec{k}_2 . Обратимся к рис. 4.б., иллюстрирующему каждый из отрезков, составляющих траекторию луча, успешно вышедшего обратно на поверхность СВП.

Как было оговорено ранее, МШ представлен сферой с известным центром в точке C и радиусом R . Для того, что бы найти P_2 (точку пересечения шарика и луча (P_1, \vec{k}_2)), достаточно решить систему из уравнения прямой, записанного в параметрическом виде, и уравнения сферы, подставив соответствующие параметры:

$$\begin{cases} (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2 = R^2 \\ x = x_{P_1} + x_{k_2} t \\ y = y_{P_1} + y_{k_2} t \\ z = z_{P_1} + z_{k_2} t \end{cases}$$

Из двух найденных точек, очевидно, следует выбрать ту, которая ближе к точке P_1 , что можно легко установить, найдя длину вектора $\overline{P_1 P_2}$. Определившись с координатами точки P_2 , необходимо проверить условие, заложенное в модель: P_2 должна находиться в среде покрывающего слоя 2 (рис. 4.б.). Так, как раздел подложка-покрывающий слой задается в модели толщиной покрывающего слоя, то достаточно найти расстояние от точки P_2 до плоскости СВП и проверить, меньше ли оно толщины покрывающего слоя.

Убедившись в том, что точка P_2 удовлетворяет всем необходимым критериям, можно переходить к расчету вектора \vec{k}_3 . Будем рассматривать окрестность на поверхности сферы рядом с точкой P_2 плоской, а нормаль к ней определим как нормаль к сфере в этой точке, то есть как вектор $\overline{CP_2}$ (рис. 5.а.).

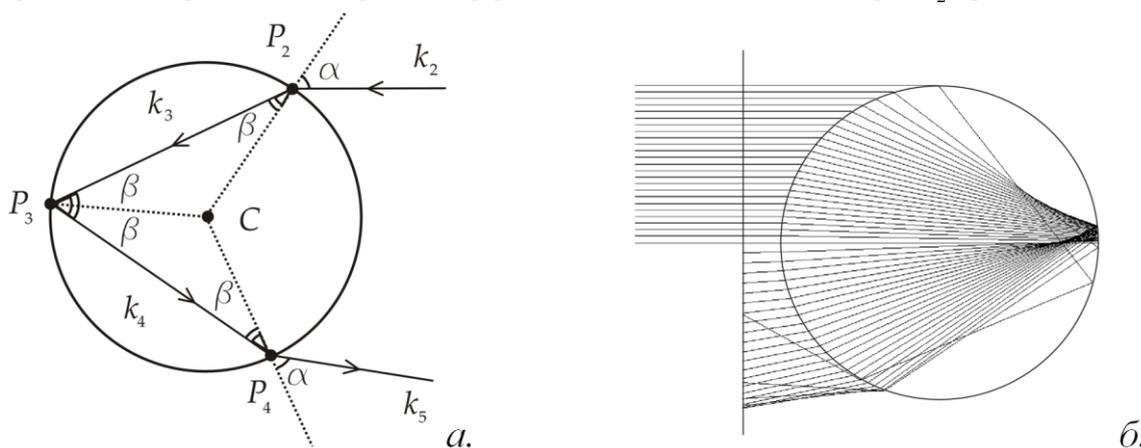


Рис. 5. К использованию симметрии

Такой подход позволяет воспользоваться вышеописанными выкладками для точки P_1 . Основным условием, накладывающимся моделью на данном этапе является отсутствие ПВО на границе раздела сред

микрошарик и покрывающий слой. Тот факт, что в точке P_4 луч выходит из шарика под тем же углом α , под каким он попал в шарик, следует из обратимости формулы Снеллиуса.

Аналогичные вычисления проделываются для точки P_3 . По условию модели, точка P_3 должна находиться за границей раздела подложка-покрывающий слой, что отражается как изменение знака в неравенстве при проверке. Точка P_4 рассчитывается аналогично, но предполагается, что она должна находиться на границе раздела шарик-покрывающий слой. Чрезвычайно важным является тот факт, что в общем случае вектора \vec{k}_1 и \vec{k}_2 лежат в одной плоскости, а вектора $\vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4, \vec{k}_5, \vec{k}_6$ - в другой. Подробно это будет описано в нижеизложенном разделе, посвященном расчету амплитуды.

Для того чтобы определить точку P_5 выхода луча на поверхность СВП, необходимо найти пересечение луча (P_4, \vec{k}_5) и лицевой плоскости СВП. Сначала целесообразно убедиться, что $\vec{n} \cdot \vec{k}_5 > 0$, иначе либо не существует пересечения вообще, либо луч оказался направлен в сторону подложки. Далее запишем уравнение плоскости в каноническом виде, а прямой - в параметрическом, и решим полученную систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = x_n \\ B = y_n \\ C = z_n \\ D = -(Ax_{M_1} + By_{M_1} + Cz_{M_1}) \\ x = x_{P_4} + x_{k_5} t \\ y = y_{P_4} + y_{k_5} t \\ z = z_{P_4} + z_{k_5} t \\ Ax + By + Cz + D = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A = x_n \\ B = y_n \\ C = z_n \\ D = -(Ax_{M_1} + By_{M_1} + Cz_{M_1}) \\ t = \frac{-(Ax_{P_4} + By_{P_4} + Cz_{P_4} + D)}{(Ax_{k_5} + By_{k_5} + Cz_{k_5})} \\ x = x_{P_4} + x_{k_5} t \\ y = y_{P_4} + y_{k_5} t \\ z = z_{P_4} + z_{k_5} t \end{array} \right.$$

Найденные таким образом координаты принадлежат точке P_5 . Теперь необходимо провести процедуру растеризации, так как требуется узнать выходное положение трассированного луча в дискретной решетке. По своей сути, эта задача является обратной к первой из освещенных в этом разделе. Для ее решения целесообразно найти координаты точки P_5 в базисе, образованном векторами $\vec{M_1M_3}, \vec{M_1M_2}$, $\vec{n} = \vec{M_1M_3} \times \vec{M_1M_2}$ (см рис. 1.). Искомые координаты в дискретной сетке размером $W \cdot H$:

$$X = Wx_r, X : X \in [0, 1, 2, \dots, W - 1]$$

$$Y = Hy_r, Y : Y \in [0, 1, 2, \dots, H - 1]$$

причем округление до целых происходит в нижнюю сторону.

На рис. 5.б. показано семейство лучей входящих (в верхней части рисунка) и выходящих (в нижней части рисунка) а также траектории их распространения в МШ. Расчеты проводились в соответствии с методикой изложенной выше.

Как видно из описания, модель не учитывает многократного переотражения лучей как внутри одного микрошарика, так и между несколькими МШ, а так же не учитывает вторичных лучей, образованных частичным отражением на границе разделов. Такой подход основан на предположении о том, что в ходе многократного переотражения амплитуда значительно уменьшается и не дает существенный энергетический вклад в итоговое АФР на поверхности СВП.

Расчет набег фазы внутри СВП.

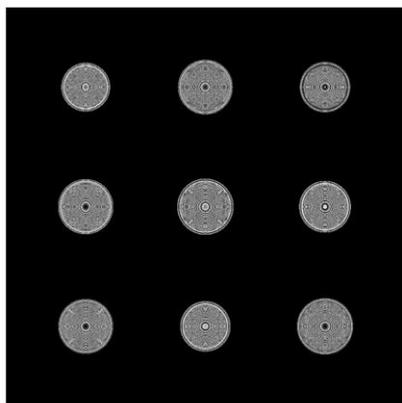
Расчет набег фазы при распространении света в изотропных диэлектрических средах в приближении геометрической оптики сводится к тому, что рассчитывается количество волн, уместившихся на отрезке, пройденном лучом. Тогда набег фазы φ можно описать как:

$$\begin{cases} \varphi = \sum_{i=0}^k \omega t_i = 2\pi\nu \sum_{i=0}^k \frac{l_i}{v_i} \\ c = \lambda\nu \\ n_i = \frac{c}{v_i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varphi = 2\pi\nu \sum_{i=0}^k \frac{l_i}{v_i} \\ \frac{\nu}{v_i} = \frac{n_i}{\lambda} \end{cases} \Rightarrow \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=0}^k n_i l_i$$

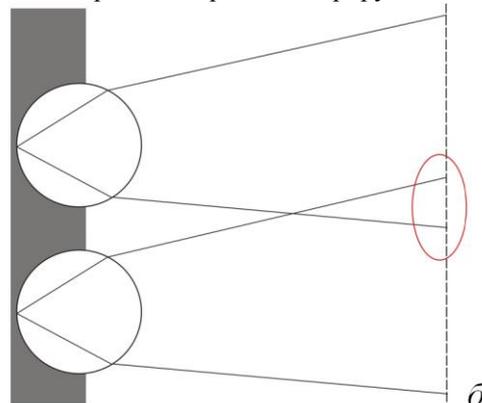
где ω - циклическая частота, $i \in [0, 1, 2, \dots, k]$ - указывает на различные диэлектрики, t - время, за которое свет преодолел отрезок длиной в l , распространяясь со скоростью ν , n - абсолютный показатель преломления диэлектрика для излучения с длиной волны в вакууме λ .

Естественно, что этот набег не различается для параллельной и перпендикулярной составляющих поля. Однако, при отражении в точке P_3 , в общем случае возникает разность фаз между компонентами. Она равна нулю, когда отражение происходит от диэлектрика под углами, меньшими ПВО для раздела микрочаширок-подложка. При ПВО эта разность будет зависеть от коэффициента преломления и угла падения на границу раздела. В случае,

когда подложка является металлом, разность фазы между компонентами всегда существует. Таким образом, в общем случае, после отражения свет может становиться эллиптически поляризованным. Однако в таком случае получается, что нельзя воспользоваться скалярной теорией дифракции, что вынуждает отказаться от рассмотрения металлов в качестве подложки в модели. Лучи, испытывающие ПВО в точке отражения от подложки-диэлектрика при моделировании просто игнорируются.



а.



б.

Рис. 6. а) Распределение фазы на выходе лучей из плоскости
б) Накладывающиеся распределения при глубоком залегании

На рис. 6.а. представлено распределение фазы в выходящих лучах на границе покрытие-воздух. Как видно из рисунка, это распределение представляет собой совокупность отдельных круглых излучателей с варьируемыми размерами и расстояниями между отдельными элементами. Необходимо отметить, что при достаточно большой глубине залегания МШ относительно границы выходящие лучи могут начать пересекаться (рис.6.б.) и псевдорешетка превратится практически в диффузно отражающую поверхность.

Расчет амплитуды поля при трансформации на СВП.

При прохождении через структуру СВП МШ свет неоднократно претерпевает переход через границы раздела сред.

Коэффициенты пропускания и отражения отличаются для параллельной и перпендикулярной составляющих поля и для границы раздела диэлектрик-диэлектрик могут быть рассчитаны с помощью формул Френеля [11].

Как было отмечено ранее, в разделе, описывающем распространение луча в СВП, траектория

луча состоит из ломанной, лежащей в двух плоскостях: в общем случае вектора \vec{k}_1 и \vec{k}_2 лежат в одной плоскости, а вектора \vec{k}_2 , \vec{k}_3 , \vec{k}_4 , \vec{k}_5 , \vec{k}_6 - в другой (рис. 4. б.). При этом плоскость поляризации лазера в общем случае так же не совпадает с плоскостью падения луча на СВП МШ. Вынужденное приведение разных результирующих плоскостей поляризации лучей порождает еще один этап перераспределения на компоненты - в выходной общий базис.

Таким образом, перераспределение между параллельной и перпендикулярной компонентами происходит трижды - при проецировании из плоскости поляризации лазера на плоскость падения луча на СВП, при падении луча на МШ, при пересчете итоговой поляризации в общем выходном базисе.

Промежуточные потери, различные для компонент, ведут к изменению плоскости поляризации и вынуждают пересчитывать вектора поляризации. Этот факт отражается вынужденным разложением

и обратным сложением векторов, проиллюстрированном рис. 7.а..

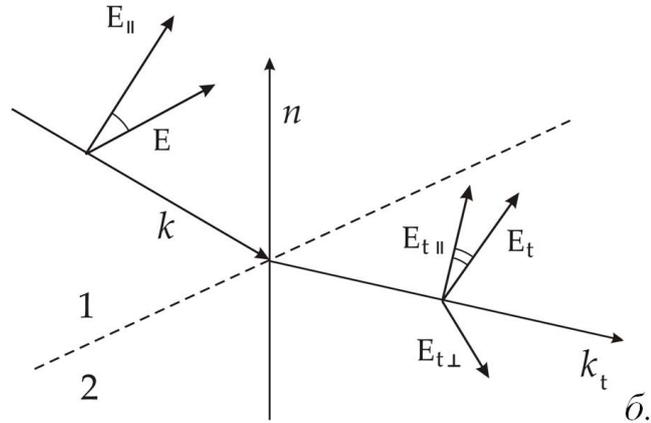
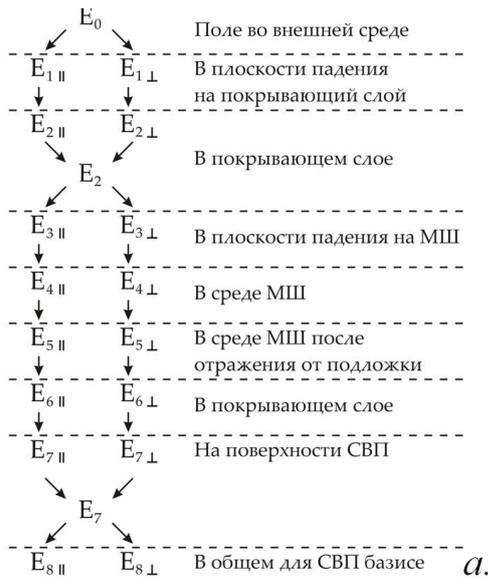


Рис. 7. а) Этапы преобразования амплитуды

б) Изменение поляризации при изменении плоскости падения и прохождении раздела сред

Такая особенность вынуждает производить все вычисления в трехмерном пространстве. Покажем, как можно произвести расчет перераспределения поляризации на примере рис. 7.б..

Зная вектор поляризации \vec{E} в первой среде, а также направляющий вектор \vec{k} и нормаль границе раздела сред \vec{n} , можно рассчитать вектор параллельной компоненты для первой среды, пока лишь указывающий ориентацию в пространстве:

$$\vec{E}_{\square} = \vec{k} \times (\vec{n} \times \vec{k})$$

Зная вектор компоненты можно рассчитать угол между \vec{E} и \vec{E}_{\square} :

$$\phi = \arccos(\vec{E} \cdot \vec{E}_{\square})$$

Очевидно, что теперь можно найти компоненты вектора \vec{E} для плоскости падения:

$$E_{\square} = |\vec{E}| \cos \phi$$

$$E_{\perp} = |\vec{E}| \sin \phi$$

Далее к полученным скалярам применяются формулы Френеля и получаются скаляры для прошедшего луча E_{\square} и E_{\perp} . Теперь, для того что бы воссоздать вектор поляризации для прошедшего луча, следует рассчитать вектора его компонент:

$$\vec{E}_{\square} = \vec{k}_t \times (\vec{n} \times \vec{k}_t)$$

$$\vec{E}_{\perp} = \vec{k}_t \times \vec{E}_{\square}$$

, что позволяет, предварительно пронормировав полученные вектора до единичных, сложить их с соответствующими весовыми коэффициентами и получить вектор поляризации во второй среде:

$$\vec{E}_t = E_{\square} \vec{E}_{\square} + E_{\perp} \vec{E}_{\perp}$$

Последним преобразованием является проверка на ориентацию вектора падающего поля и разворот рассчитанного прошедшего, если это необходимо. Действуя аналогичным образом, необходимо рассчитать поляризацию для плоскости падения в пересечении с МШ, далее же достаточно работать со скалярами в порядке, указанном на рис.

Каждый луч в точке выхода на поверхность имеет собственную поляризацию. Для применения скалярной теории дифракции достаточно разложить для каждого из лучей вектор поляризации на параллельную и перпендикулярную в общем для всех базисе. Ортогональные составляющие между собой не интерferируют, а значит можно рассчитать их образы в дальней зоне отдельно.

Этап третий. Поиск дифракционной картины в дальней зоне.

После того, как было найдено АФР на поверхности отражателя, можно приступить к поиску формируемого в дальней зоне изображения. Для этого обратимся к базовым понятиям теории дифракции. АФР на плоскости можно рассматривать как совокупность точечных источников излучения, когерентность которых обеспечивается природой освещающего поверхность лазера. Выражение для монохроматической волны имеет вид

$$u(x, y, t) = A(x, y) \cos(2\pi\nu t + \varphi(x, y))$$

Или, иначе

$$u(x, y, t) = \text{Re}[U(x, y) \exp(-j2\pi\nu t)]$$

$$U(x, y) = A(x, y) \exp(-j\varphi(x, y))$$

Функцию $U(x, y)$ еще называют фазором, она и описывает АФР.

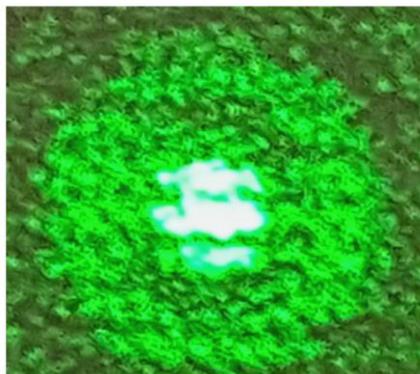
В силу линейности волнового уравнения, а так же когерентности излучения, формируемую дифракционную картину можно представить как интеграл суперпозиции [12]

$$U(x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x_0, y_0; x_1, y_1) U(x_1, y_1) dx_1 dy_1$$

Где

$$h(x_0, y_0; x_1, y_1) = \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(\vec{n}, \vec{r}_{01})$$

Пределы записаны бесконечными ввиду того, что вне области источника функция $U(x_1, y_1)$ обращается в ноль, что удовлетворит граничным условиям Кирхгофа.

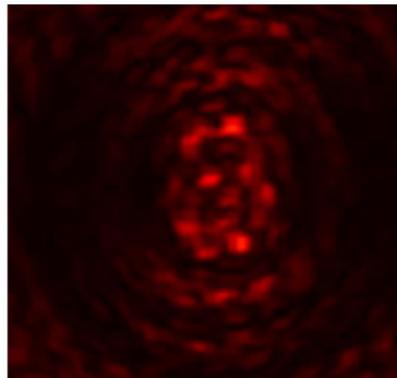


а.

Полагая z достаточно большим, используя приближение Фраунгофера, можно представлять интеграл суперпозиции как преобразование Фурье:

$$U(x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_1, y_1) \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x_1 + y_0 y_1)\right) dx_1 dy_1$$

Полученный фурье-образ и представляет собой дифракционную картину в дальней зоне. Применимо к модели, нужно отметить, что рассчитываются два фурье-образа – для параллельной и перпендикулярной составляющих относительно общего базиса, а затем пересчитанные интенсивности складываются.



б.

Рис. 8. Спекл-структура: а) в физической модели б) в имитационной модели

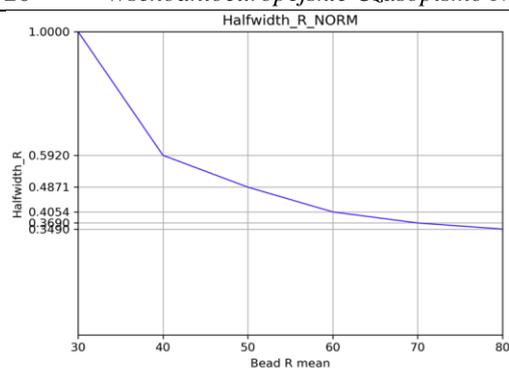
На рис. 8.б. представлено рассчитанное по описанной выше методике распределение интенсивности в дальней зоне дифракции, полученное при освещении совокупности МШ гауссовским пучком. Из рис. видно, что данное распределение представляет собой совокупность отдельных пятен (спеклов), промодулированных распределением, соответствующим закономерностям дифракции на одном МШ в виде совокупности концентрических колец. Вид полученного распределения соответствует закономерностям теории дифракции и результатам физического моделирования (рис. 8.а.).

Результаты моделирования

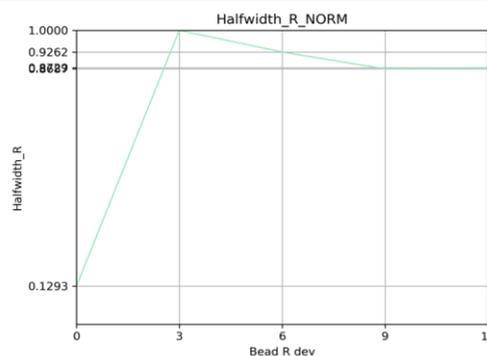
Как отмечалось выше, целью разработки данной имитационной модели являлось создание инструмента, позволяющего изучить свойства световозвращения при широком варьировании значений таких параметров как диаметр МШ, расстояние между ними, глубина их залегания, показатели преломления всех сред, и т.д. Указанные выше параметры могут быть либо детерминированными либо случайными, распределенными по нормальному закону. Кроме того, имеется возможность варьировать параметры лазерного излучения: длину волны, диаметр луча, угол падения на СВП и т.д. На основе результатов моделирования можно оценить влияние этих параметров на характеристики световозвращения.

С практической точки зрения важнейшим параметром СВП является степень пространственной концентрации энергии. На основе теории дифракции можно полагать, основная часть энергии сосредоточена в пределах нулевого порядка дифракции лазерного луча на одном МШ. В качестве количественной меры концентрации энергии можно принять величину ширины нулевого максимума по его полувысоте. Чем меньше эта величина, тем выше степень пространственной концентрации энергии отраженного луча возвращаемого в направлении излучателя.

В качестве иллюстрации эффективности описанной в данной работе модели приведем результаты имитационного моделирования для оценки влияния размеров МШ на ширину диаграммы возвращаемого излучения. Результаты такого моделирования приведены на рис. 9.а.. Здесь по оси абсцисс отложены значения размера (детерминированного) МШ, а по оси ординат - значения полуширины возвращенного луча. Полученная зависимость отражает известный из теории дифракции факт обратной пропорциональности ширины диаграммы дифрагированного луча от диаметра излучателя, что является верифицирующим фактором для данной модели.



а.



б.

Рис. 9. а) Полуширина при различных радиусах (мкм) МШ
 б) Полуширина при различных СКО радиуса (мкм) (0-40% от матожидания)

Менее очевидными являются результаты моделирования зависимости ширины диаграммы от величины среднеквадратического отклонения (СКО) его размера от среднего значения. На рис.9.б. по оси абсцисс отложены значения СКО, а по оси ординат - нормированная на максимальное значение величина ширины возвращенного луча измеренного по его полувысоте. Из приведенной зависимости видно, что наилучшее световозвращение обеспечивается при идеальном изготовлении МШ, когда значение СКО равно нулю. При возрастании величины СКО до 40% ширина диаграммы возвращенного луча увеличивается в 4-5 раз. Этот результат может иметь важное практическое значение для совершенствования технологии изготовления МШ для СВП. Аналогичным образом с помощью данной модели могут быть получены другие результаты относительно световозвращения при варьировании соответствующих параметров и сформулированы рекомендации по совершенствованию технологических процессов.

Заключение

В данной работе предложена имитационная модель для оценки параметров световозвращения при отражении/дифракции лазерного луча на СВП, состоящей из совокупности диэлектрических микрошариков. В модели описаны закономерности трансформации амплитудно-фазового распределения падающего излучения на основе лучевой оптики. Получены соотношения для расчета траектории луча, набега фазы при его распространении (отражении/преломлении) в элементах СВП. На основе формул Френеля получены соотношения для расчета амплитудного распределения поля на выходе СВП с учетом характера поляризации падающего лазерного излучения. Для оценки параметров световозвращения использовалось двумерное преобразование Фурье от полученного на предыдущем этапе амплитудно-фазового распределения поля на выходе СВП. Приведенные результаты моделирования имеют хорошее соответствие с теорией дифракции, результатами физического моделирования и могут быть использованы для разработки требований к технологическим процессам изготовления СВП.

Список литературы

1. R. M. Measures, *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Malabar, FL, 1992.
2. T. Fukuchi and T. Shiina, *Industrial Applications of Laser Remote Sensing*. Bentham Science Publishers, 2012.
3. J. Lloyd, *A brief history of retroreflective sign face sheet materials. The principles of retroreflection*. REMA publications, 2008.
4. G.N. Dolya and A.N. Katunin and O.A. Nad and A.N. Bulay, "Laser speckle velocimetry for running objects with light reflective surface," *Systems of information processing*, Kharkiv, KhUAF, Issue 1(126), pp. 23-26, 2015.
5. G. Dolya and O. Lytvynova, "Modeling the Method of Laser Doppler Speckle-Velocimetry for Flat Objects with Retroreflective Surface," *Asian Engineering Review*, vol.4, no. 2 pp. 7-13, 2017. Retrieved from: <http://www.asianonlinejournals.com/index.php/AER/article/viewFile/1235/1086>
6. Gregory Dolya; Kostiantyn Bondarenko (2018). Laser Doppler Velocimetry of Rotating Cylinder with Retroreflecting Surface. *Asian Engineering Review*, 5(1): 1-7. Retrieved from: <http://www.asianonlinejournals.com/index.php/AER/article/view/1591/pdf>
7. D. Héricz, T. Sarkadi, G. Erdei, T. Lazuech, S. Lenk, and P. Koppa. Simulation of small- and wide-angle scattering properties of glass-bead retroreflectors. *Applied Optics* Vol. 56, Issue 14, pp. 3969-3976 (2017)
8. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. Москва: Наука 1970. – 856 с.
9. Kogelnik H. *Laser Beams and Resonators* / H. Kogelnik, T. Li. – OSA Publishing: Applied optics, 1966.– Vol. 5. No.10
10. Маркузе Д. Оптические волноводы / Д. Маркузе ; пер. с англ. В. В. Шевченко. – Москва: Издательство «Мир», 1974. – 576 с.
11. Стафеев С. К. Основы оптики: Учебное пособие / С. К. Стафеев, К. К. Боярский, Г. Л. Башнина – СПб.: Питер, 2006. – 336 с.
12. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. – Москва: Мир, 1970. – 363 с.

Budko V.I.

*Ph.D., Candidate of technical science,
Associate Professor the Department of Renewable Energy Sources,
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

ASSESSMENT OF THE HYDROGEN BATTERY CAPACITY UNDER USE OF WIND ELECTRIC INSTALLATIONS AS PRIME ELECTRICITY GENERATORS WITHIN COMPLEX OF AUTONOMOUS CHARGING STATION FOR ELECTRIC CARS ON FUEL ELEMENTS

Будько Василь Іванович

*кандидат технічних наук,
доцент кафедри відновлюваних джерел енергії,
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ АКУМУЛЯТОРУ ВОДНЮ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ЯК ПЕРВИННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СКЛАДІ АВТОНОМНОЇ ЗАПРАВНОЇ СТАНЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Abstract. The hydrogen compression modes were studied for purpose of its further storage within the proposed scheme of an autonomous charging station for electric cars on fuel cells where the primary electric energy generator is presented by wind electric installation. The wind turbine modes of electric power generation with further production of hydrogen for recharging of the electrical vehicles on fuel cells were analysed based on actual collected experimental data of wind speed for the given area. Mathematical formulas were proposed for capacity calculation of the high-pressure tank reservoir for the purpose of the seasonal hydrogen storage followed by its use in periods of the base energy source absence. The energy backup coefficient, which is necessary to take into consideration in order to ensure the efficient operation of the autonomous charging station for electric cars on fuel cells system, was established. The proposed approach of energy capacity calculation for high-pressure hydrogen storage tanks may be used for similar systems implemented in any locations provided that wind speed data onsite is provided.

Анотація. Для запропонованої схеми автономної заправної станції електромобілів на паливних елементах в якій первинним генератором електричної енергії виступає вітроелектрична установка розглянуто режими стиснення водню для його подальшого зберігання. На основі реальних експериментальних даних швидкості вітру для заданої місцевості проаналізовано режим виробітку електричної енергії вітроустановкою з подальшим виробництвом водню для заправки електромобілів на паливних елементах. Запропоновано математичний вираз визначення ємності баку накопичувача високого тиску з метою сезонного зберігання водню з подальшим його використанням в періоди відсутності базового енергоносія. Встановлено коефіцієнт запасу енергії, який необхідно враховувати для забезпечення ефективної роботи системи водневої автономної заправної станції електромобілів на паливних елементах. Запропонований підхід до визначення енергоємності баків для зберігання водню під високим тиском може застосовуватись для аналогічних систем реалізованих в будь-яких місцевостях за умови наявності реальних даних швидкості вітру.

Keywords: wind power installation, autonomous charging station, electrical vehicle on fuel cells.

Ключові слова: вітроелектрична установка, автономна заправна станція, електромобіль на паливних елементах.

Постановка проблеми: проводиться вивчення технічних показників системи водневої автономної заправної станції електромобілів на паливних елементах де в якості первинного генератора електричної енергії виступає вітроелектрична установка змінного струму задля встановлення енергоємності акумулятору водню високого тиску з метою ефективного функціонування системи протягом року.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження даної проблеми проводилися вітчизняним вченим Кудрею С.О. (1990), та зарубіжними вченими: F.J. Pino Lucena та ін. (2008), A.K. Kaviani та ін. (2009).

Невирішені раніше частини загальної проблеми: загальна науково-практична проблема полягає в пошуку варіантів розширення можливостей використання енергопотенціалу вітру без негативного впливу на роботу об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України.

Цілі статті: 1. Проаналізувати режим виробітку електричної енергії вітроелектричною установкою з використанням реальних даних швидкості вітру для заданої місцевості. 2. Встановити періоди з перевищенням виробітку електроенергії над потребою для виробництва водню з метою встановлення енергоємності баку високого тиску. 3. Встановити енергетичний запас для забезпечення

роботи системи водневої АЗС ЕМПА в крайових умовах.

Матеріали і методи. *Об'єкт дослідження:* процеси перетворення енергії вітру при виробництві водню методом електролізу в системі автономної заправної станції електромобілів.

Предмет дослідження: система водневої автономної заправної станції електромобілів на паливних елементах з використанням вітоелектричних установок як первинних генераторів електричної енергії. Для вирішення поставлених завдань були використані статистичні методи оцінки та аналізу даних з використанням програмних пакетів Mathlab2015 та Microsoft Excel 2013.

Виклад основного матеріалу. Згідно аналізу модельного ряду комерційних легкових електричних транспортних засобів на паливних елементах потреба у водні на один комерційний легковий

$$120\text{ м}^3 (1\text{ атм}) \xrightarrow[\text{електролізі}]{\text{стиснення}} = 4,025\text{ м}^3 (30\text{ атм}) \xrightarrow[\text{компресора}]{\text{стиснення}} = 0,171\text{ м}^3 (700\text{ атм}) \quad (2)$$

Однак, для вибору необхідних об'ємів з урахуванням діаграми виробітку енергії первинними двигунами (ВЕУ) необхідна оцінка надходження енергоресурсу з виділенням зон максимального виробітку і відповідно відсутності енергоносія (вітру).

Прийmemo максимальну добову потребу для заправки одного ЕМПА на рівні $V_{\text{ДОБ}}^{H_2} = 120 \text{ м}^3$ та

ЕМПА може становити до 120 м^3 (наприклад, коли електромобіль Honda Clarity з повністю розрядженими бортовими ємностями для водню доставлений на АЗС за допомогою аварійного канату чи привезений евакуатором). В такому разі при виробництві водню протонобмінним електролізером (РЕМ) з витратою $5,178 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3(\text{H}_2)$ [1] потреба в електроенергії становитиме $621,36 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Якщо прийняти схему реалізації водневої АЗС ЕМПА з використанням ВЕУ згідно (рис. 1) [2], то стиснення водню реалізується по двох ступенях з відповідним зберіганням в першій (при 30 атм) та другій (при 700 атм) ємностях і, відповідно до закону Бойля-Маріота:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = P_3 \cdot V_3, \quad (1)$$

з розрахунку добової потреби на 1 легковий ЕМПА, яка прийнята на рівні $120 \text{ м}^3 (\text{H}_2)$, об'єми акумулюючих ємностей становитимуть:

витрату електроенергії на виробництво одного метра кубічного $E_{H_1} = 5,178 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. Тоді добова потреба в електроенергії при прийнятій витраті водню становитиме $E_{H_1}^{\text{ДОБ}} = 621,36 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ і, відповідно, річна потреба в електроенергії складе $E_{H_1}^{\text{Р}} = 227,4 \text{ МВт}\cdot\text{год}$.

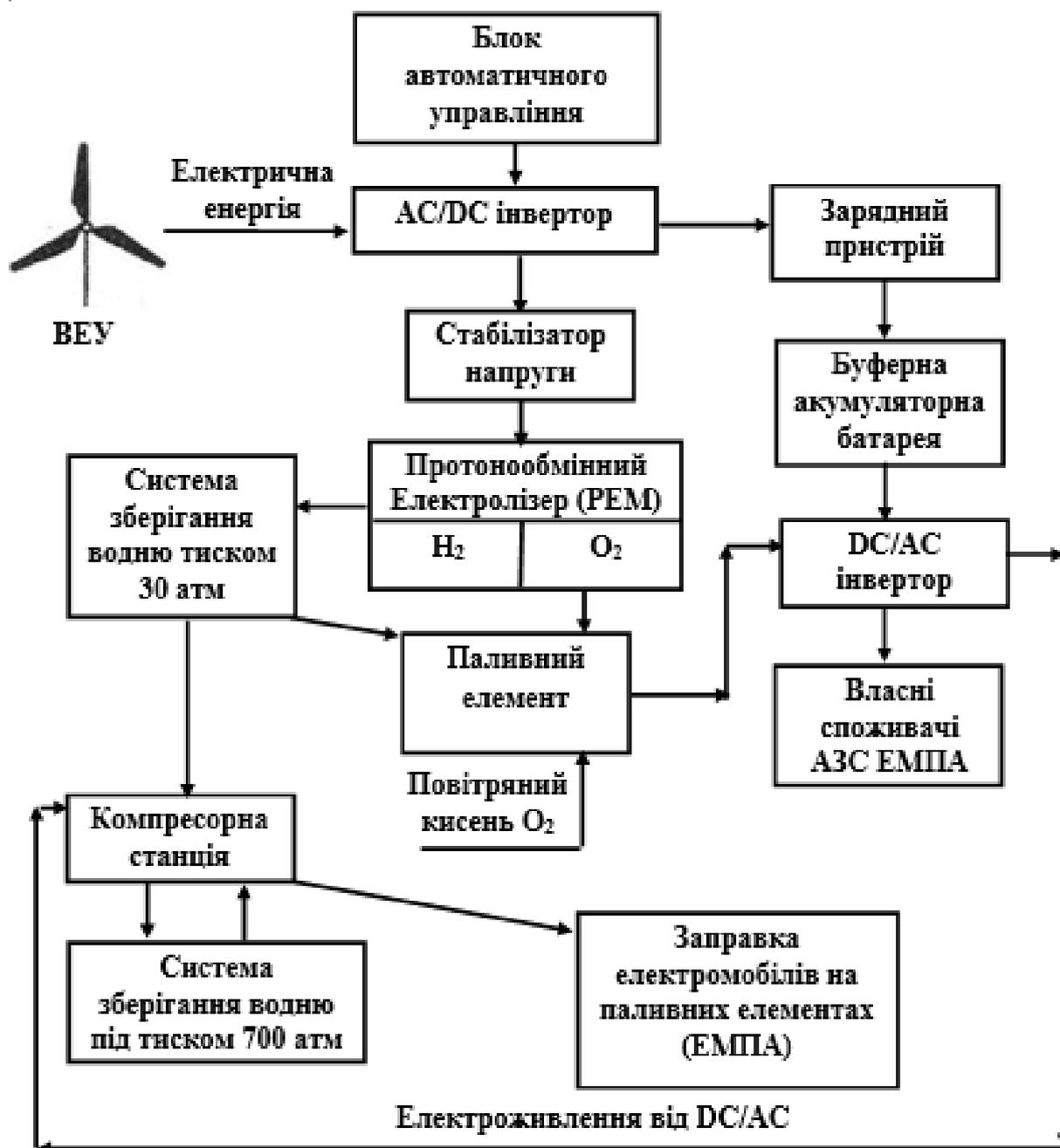


Рис. 1. Схема автономної зарядної станції електромобілів на паливних елементах з використанням вітроелектричної установки

Розглянемо варіант забезпечення електроенергією водневої АЗС ЕМПА за рахунок вітроелектричної установки при умові що $E_{AB}^{BY\Phi} = const$. В такому разі:

$$E_{BEY} = E_B + const \quad (3)$$

Проаналізуємо в програмному середовищі Microsoft Excel 2013 забезпечення електроенергією водневої АЗС ЕМПА від ВЕУ з врахуванням розподілу швидкостей вітру для м. Мелітополь Запорізької області, Україна, використавши при цьому реальні експериментальні дані вимірювання швидкості вітру (V) для заданої місцевості.

Розрахунок виробітку електричної енергії від ВЕУ проводили за наступним алгоритмом.

Для конкретних ВЕУ різної одиничної встановленої потужності проводили розрахунок коефіцієнтів використання енергії вітру на основі кривої потужності. При цьому перерахунок проводили згідно наступного рівняння:

$$\xi = \frac{P_{BEY}}{P_{ПП}}, \quad (4)$$

де ξ – коефіцієнт використання енергії вітру (коефіцієнт потужності);

P_{BEY} – потужність вітроелектричної установки, Вт;

$P_{ПП}$ – потужність повітряного потоку, Вт.

$$P_{ПП} = F \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2}, \quad (5)$$

де F – площа, яку окреслює вітроколесо, m^2 ,

$$F = \pi \cdot d^2 / 4;$$
 ρ – густина вітрового потоку, kg/m^3 ($\rho = 1,225$ kg/m^3 при температурі $15^\circ C$ і атмосферному тиску $0,0981$ МПа (760 мм рт.ст.));
 V – швидкість повітряного потоку, m/sec .

Використовуючи основні технічні характеристики (криві потужності $P=f(V)$) комерційних ВЕУ в діапазоні потужностей від 50 кВт до 500 кВт, отримали усереднену залежність коефіцієнту використання енергії вітру від швидкості вітру (рис. 2), яка показала, що максимальні значення використання ефективності повітряного потоку досягаються в діапазоні швидкостей вітру $8-10$ м/с.

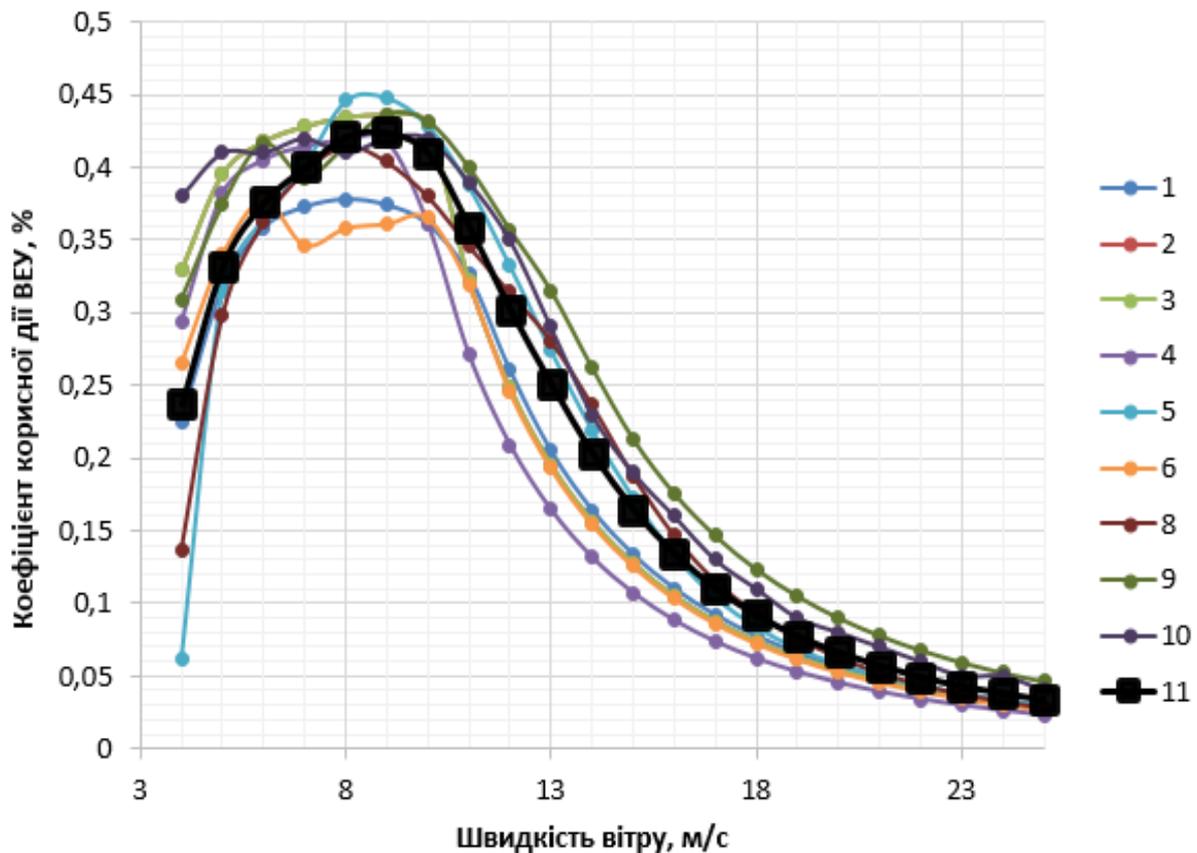


Рис. 2. Залежність коефіцієнту використання енергії від швидкості для різних типів вітроелектричних установок:

- 1 – ВЕУ 50 кВт *polarisamerica*, США; 2 – ВЕУ 100 кВт *Norvento nED 100-22*, Іспанія;
 3 – ВЕУ 100 кВт *Norvento nED 100-24*, Іспанія; 4 – ВЕУ 150 кВт *AN Bonus 150/30*, Німеччина;
 5 – ВЕУ 200 кВт *Vestas V25*, Данія; 6 – ВЕУ 250 кВт *C&F Green Energy*, Італія;
 7 – ВЕУ 350 кВт *Suzlon S.33-350*, Індія; 8 – ВЕУ 400 кВт *Turbowinds T400-34*, Бельгія;
 9 – ВЕУ 500 кВт *Enercon E-40/5.40*, Німеччина;
 10 – усереднена залежність для ВЕУ в діапазоні від 50 кВт до 500 кВт.

Розрахунок виробітку електричної енергії проводили згідно рівняння:

$$E = P_{III} \cdot \tau \cdot w \cdot \xi, \quad (6)$$

де E – річне вироблення електроенергії при заданій швидкості вітру, кВт·год;

$\tau = 8760$ – кількість годин у році;

w – повторюваність швидкості вітру, %.

Результати розрахунку виробітку електроенергії 1 m^2 вітроколеса представлено на рис. 3, а її сумарне значення за рік складає 997 кВт·год. Відповідно, для забезпечення річної потреби в електроенергії тільки на роботу протонобмінного електролізера в $227,4$ МВт·год необхідний діаметр вітроколеса у $17,4$ м (стандартизована 18 м), що відповідає класу ВЕУ потужністю 80 кВт.

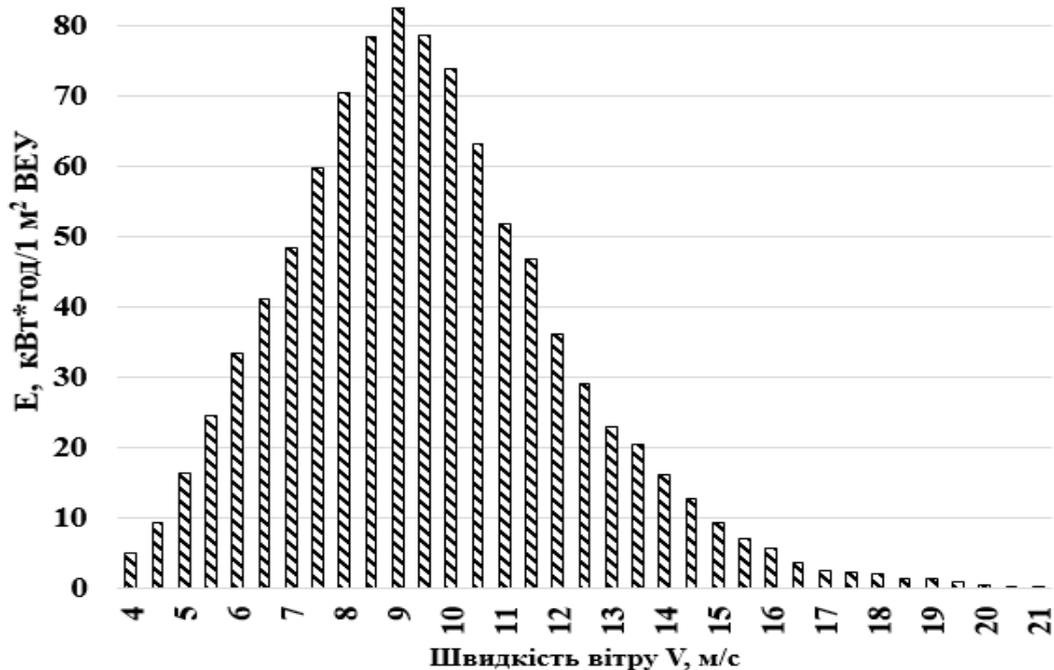


Рис. 3. Діаграма виробітку електроенергії 1 м² площі вітроколеса згідно експериментальних даних швидкостей вітру для м. Мелітополь Запорізької області, Україна за період 01.11.2015-31.12.2016

Для порівняння, проведено розрахунок виробітку електроенергії 1 м² вітроколеса по даним метеоспостережень NASA [3] в результаті якого отримали виробіток за рік в 852 кВт·год. Результати розрахунку виробітку електроенергії представлено на рис. 4. Різниця між першим та другим результатами розрахунків може пояснюватись методикою вимірювань. Якщо перші дані отримані безпосереднім вимірюванням швидкості вітру на метео-

пості анемометром, то дані NASA отримані за допомогою супутникового спостереження, і очевидно що останнє спостереження має певні неточності, які в даному випадку складають біля 8%. Слід також відмітити, що згідно реальних даних вимірювання швидкості вітру максимальний виробіток 1 м² вітроколеса спостерігається при 9 м/с, в той час, як по супутниковим даним NASA максимальний виробіток 1 м² вітроколеса спостерігається при 8÷8,5 м/с.

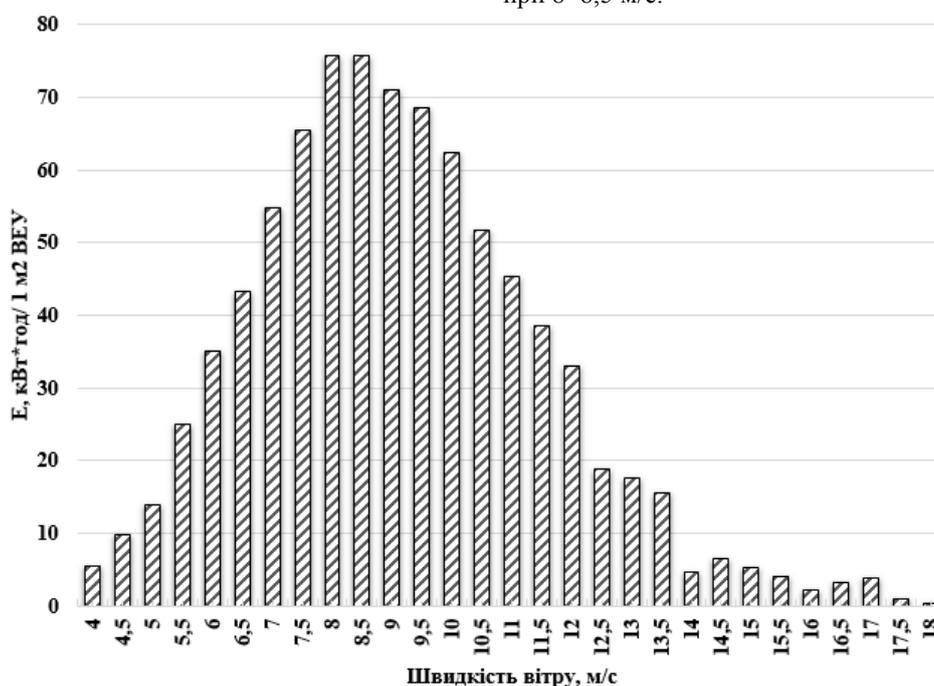


Рис. 4. Діаграма виробітку електроенергії 1 м² площі вітроколеса згідно даних швидкостей вітру NASA для м. Мелітополь Запорізької області, Україна за період 01.11.2015-31.12.2016

З використанням програмного середовища Matlab 2015 проаналізовано дані швидкості вітру на інтервали зі швидкістю вітру менше 4 м/с та встановлено, що згідно експериментальних даних вимірювання найдовшим таким інтервал склав 146 вимірів з урахуванням кроку в 10 хв що відповідає 24,33 год (близько 1 доби). Аналіз даних NASA показав найдовшим таким інтервал у 64 виміри з

урахуванням кроку в 1 год це відповідає 64 год (біля 2,67 доби).

Аналіз характеру виробітку по місяцях показав (рис. 5) найбільше значення в жовтні місяці 2016 року та найменше значення у травні місяці 2016 року. Даний розподіл по виробітку необхідно враховувати при виборі ємностей для зберігання водню.

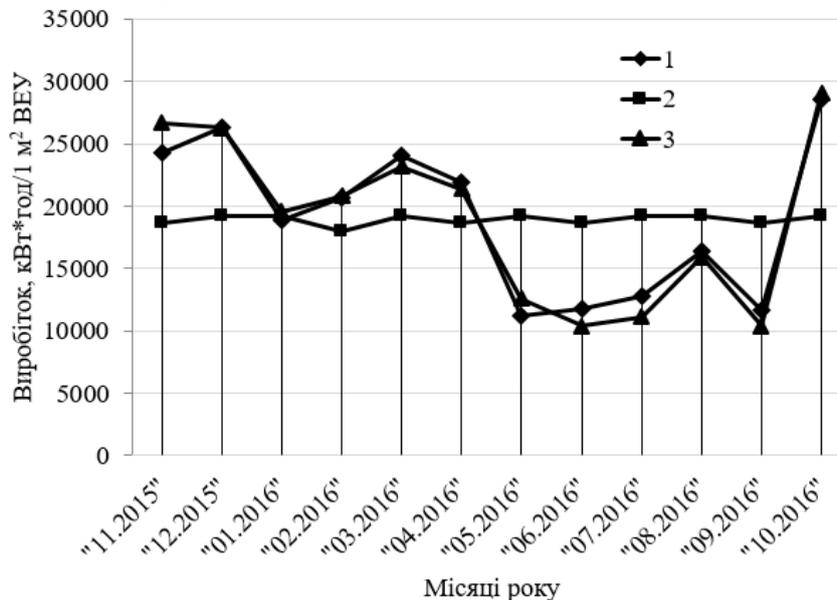


Рис. 5. Виробіток електроенергії 1 м² площі вітроколеса по місяцям на основі даних швидкостей вітру для м. Мелітополь Запорізької області, Україна:

1 – виробіток енергії за рік по місяцях згідно реальних вимірів в м. Мелітополь Запорізької області, Україна; 2 – потреба в енергії для виробництва водню по місяцях; 3 – виробіток енергії за рік по місяцях згідно супутникових даних NASA для м. Мелітополь Запорізької області, Україна.

Оскільки об'єм балону високого тиску залежить від балансу коливань енергій виробітку та споживання, тобто $V_{700} = f(\Delta E)$, або $V_{700} = f(E_{BEV} - E_{E-p})$, проаналізували баланс виробітку та споживання водню для заданої добової потреби в 120 м³ (рис. 6) та встановили, що з жовтня по квітень відбувається накопичення водню до 6088 м³ (або \approx

8,7 м³ при тиску 700 атм) з подальшим його спрацюванням за період з травня по вересень. Вибір ємності високого тиску встановленого об'єму дозволяє реалізувати ефективну роботу водневої АЗС ЕМПА в межах року. Аналогічну картину по динаміці балансу виробітку та споживання водню можна отримати при використанні даних НАСА.

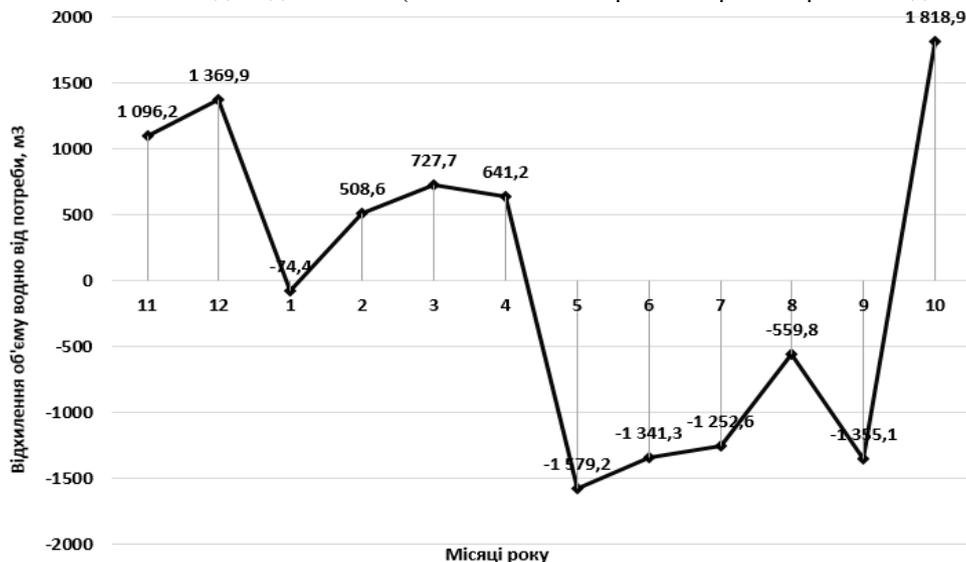


Рис. 6. Позабалансовий виробіток та споживання водню для заданої потреби по реальним даним швидкості вітру для м. Мелітополь Запорізької області, Україна

Зважаючи на відмічене вище, об'єм балону високого тиску для зберігання водню, що входить в склад АЗС ЕМПА для періоду року, коли відбуватиметься накопичення при виконанні умови $E_{BEU} > E_{H_2}^{zarp}$, визначатиметься за наступним алгоритмом:

$$V_{H_2}^{\max} = \frac{E_{BEU} - E_{H_2}^{zarp}}{E_{1m^3(H_2)}^{virob}} \cdot k_{cn}, \quad (5.19)$$

де $E_{H_2}^{zarp}$ – енергія водню, що витрачається на заправку ЕМПА, кВт·год, $E_{1m^3(H_2)}^{virob}$ – енергія, що витрачається на виробництво 1 м³ Н₂, кВт·год/м³(Н₂), k_{cn} – коефіцієнт стиснення водню.

Для визначення енергобалансу системи водневої АЗС ЕМПА з використанням ВЕУ як первинного джерела електроенергії слід приймати:

1) власні потреби в електричній енергії АЗС ЕМПА (освітлення та ін.) $E_{ВП}^{AZSEM}$ на рівні 3 кВт·год на день;

2) фактор витрати енергії на стиснення водню змінюється в діапазоні $k_C^B = 1 \div 1,15$. При цьому $k_C^B = 1$ за умови коли отримуваний водень виходить з електролізера під тиском 700 атм, і відповідно $k_C^B = 1,15$ за умови коли отримуваний водень виходить з електролізера під тиском 1 атм [4];

3) фактор витікання водню з ємностей для зберігання в залежності від тривалості зберігання та системи трубопроводів водню змінюється в діапазоні $k_B^B = 1 \div 1,05$. При цьому $k_B^B = 1$ за умови

$$E_{BEU} = 1,008 \cdot 1,05 \cdot 621,36 + \frac{1,15 \cdot 1,2}{0,8} \cdot (3 + 67) = 657,65 + 120,75 = 778,39 (\text{кВт} \cdot \text{год}). \quad (5.20)$$

Якщо позначити $K_{ZE}^{AZC} = \frac{E_{BEU}}{E_{E-p}}$, то для роботи

системи водневої АЗС ЕМПА необхідний запас енергії в заданих умовах складає $K_{ZE}^{AZC} = 1,25$.

Висновки з даного дослідження та перспективи.

1. Проаналізовано режим виробітку електричної енергії вітроустановкою з подальшим виробництвом водню для заправки електромобілів на паливних елементах, в результаті чого встановлено, що ефективне функціонування системи водневої автономної заправної станції можливе при правильному виборі ємностей високого тиску, які в періоди більшого виробництва водню накопичуватимуть його (з жовтня по квітень) з подальшим спрацюванням в періоди недостатньої інтенсивності відновлюваного енергоносія (з травня по вересень).

2. Встановлено коефіцієнт запасу енергії, який необхідно враховувати для забезпечення ефективної роботи системи водневої автономної заправної

коли отримуваний водень зберігається малий період часу (дні), і відповідно $k_B^B = 1,05$ за умови коли накопичений водень зберігається 1 рік.

4) фактор використання водню паливними елементами в наслідок повного розряду або періодичного недозаряду буферного акумулятору k_{PE}^B . Величина даного показника обумовлюється періодами тривалої відсутності відновлюваного енергоносія (енергії вітру чи сонячного випромінювання), або його слабкою інтенсивністю. Враховуючи незначну складову витрат енергії на роботу побутових приладів АЗС ($E_{ВП}^{AZSEM}$) у порівнянні з витратами на виробництво та стиснення водню, фактор використання водню паливними елементами знаходитиметься в діапазоні від 1 до 1,008.

Розглянемо рівняння 5.1. за умови, що в якості ВДЕ виступає ВЕУ. Тоді:

$$E_{BEU} = K_3^B \cdot E_{E-p} + \frac{k_C^B \cdot k_{DE}}{\eta_{AB}} \cdot E_{AB} \quad (5.20)$$

Розглянемо крайовий випадок при потребі добового вироблення 120 м³ Н₂, при умові, що стиснення водню відбувається в межах від 1 до 700 атм ($k_C^B = 1,15$), фактор витікання водню $k_B^B = 1,05$, додаткова енергія АБ $k_{DE} = 1,2$, коефіцієнт корисної дії АБ $\eta_{AB} = 0,8$, фактор використання водню паливними елементами в наслідок повного розряду або періодичного недозаряду буферного акумулятору $k_{PE}^B = 1,008$. Тоді, необхідний виробіток енергії ВЕУ становитиме:

станції електромобілів на паливних елементах. Запропонований підхід до визначення енергоємності баків для зберігання водню під високим тиском може застосовуватись для аналогічних систем реалізованих в будь-яких місцевостях за умови наявності реальних даних швидкості вітру.

Список літератури:

1. Водород в энергетике : учеб. пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 с.
2. Будько В.І., Кудря С.О., Будько М.О., Використання вітроелектричних установок для виробництва водню в складі автономних заправних станцій електромобілів на паливних елементах \ Відновлювана енергетика, - Київ, 2019, №2.
3. Renewables.ninja / Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://www.renewables.ninja/>
4. Hydrogen for transport and the B&E report / Електронний ресурс. – Режим доступу: <https://planetforlife.com/h2/h2swiss.html>

Litvinova E.I.

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department "Design Automation",
Kharkiv National University of Radioelectronics

Varetsa V.V.

Engineer of Testing and Distance Learning Center,
Kharkiv National University of Radioelectronics

ANALYSIS OF STATISTICS OF CONVERTING NUMBERS IN CODE CONVERTERS BY THE METHOD OF ACCUMULATION OF EQUIVALENTS

Литвинова Е.И.

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Автоматизация проектирования вычислительной техники»,
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Вареца В.В.

инженер центра тестирования и дистанционного обучения,
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ЧИСЕЛ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ КОДОВ ПО МЕТОДУ НАКОПЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТОВ

Summary: The structure and the functional possibilities of the software for analyzing code converters with the method of accumulation of equivalents with parallel using of conversion steps are considered.

Резюме: Рассматривается структура и функциональные возможности программного средства для анализа преобразователей кодов по методу накопления эквивалентов с параллельной стратегией использования шагов преобразования.

Keywords: transformers of code, accumulation of equivalents, shift register, parallel strategy

Ключевые слова: преобразователи кодов, накопление эквивалентов, регистр сдвига, параллельная стратегия

Постановка задачи.

Преимуществом преобразователей кодов по методу накопления эквивалентов (ПК НКЭ) является высокое быстродействие, умеренные аппаратные затраты и возможность изменения в широких пределах соотношения между аппаратными затратами и быстродействием за счет выбора типа стратегии преобразования чисел (последовательной или параллельной), числа шагов преобразований и значений шагов. Структура двух шагового ПК, ориентированного на повышение быстродействия и на последовательную стратегию детально рассмотрена в [1,2].

Целью настоящей работы является качественный и количественный анализ статистических характеристик ПК НКЭ с параллельной стратегией.

Последовательная стратегия использования шагов преобразования

При использовании последовательной стратегии преобразования чисел процесс преобразования сводится к последовательному вычитанию из состояния разрядного счетчика, в котором хранится цифра преобразуемого числа, значения шага преобразования. Если значение системы счета на входе K , то максимальное значение цифры преобразуемого числа равно $K-1$. Следовательно, максимальное число тактов преобразования старших разрядных цифр равно $K-1$. Затем, еще один такт используется для трансляции (передачи) значения цифры младшего разряда. Таким образом, суммарное число тактов преобразования равно, т.е. $N_1=K$.

Вначале ведется преобразование с шагом a . При наличии в одном из старших разрядов $x_m (m=\overline{2, n})$ максимального значения цифры $x_m = K-1$ потребуется на первом этапе $\lceil (K-1)/a \rceil$ шагов, преобразования, где $\lceil \cdot \rceil$ означают округление до меньшего целого. Затем, если хотя бы одна из оставшихся старших цифр имеет значение $x_i = a-1$, потребуется на втором этапе еще $a-1$ такт для обнуления с шагом 1 всех старших разрядных счетчиков. Следует добавить еще один такт (третий этап) для трансляции младшей цифры x_0 . Следовательно, число тактов преобразования вычисляется по формуле (1)

$$N_2^{\text{цел}} = \lceil (K-1)/a \rceil + (a-1) + 1 = \lceil (K-1)/a \rceil + a \quad (1)$$

Параллельная стратегия использования шагов

Логика управления в двухшаговом ПК параллельного типа выполнена так, чтобы запретить возможность вычитания шага 1, если в этом разряде имеется возможность вычитания шага a . И наоборот, если значение разряда x_m находится в пределах $1 \leq x_m < a$, то следует разрешить опрос вентилля, управляющего вычитанием 1 из разрядного счетчика, хранящего x_m (рис 1).

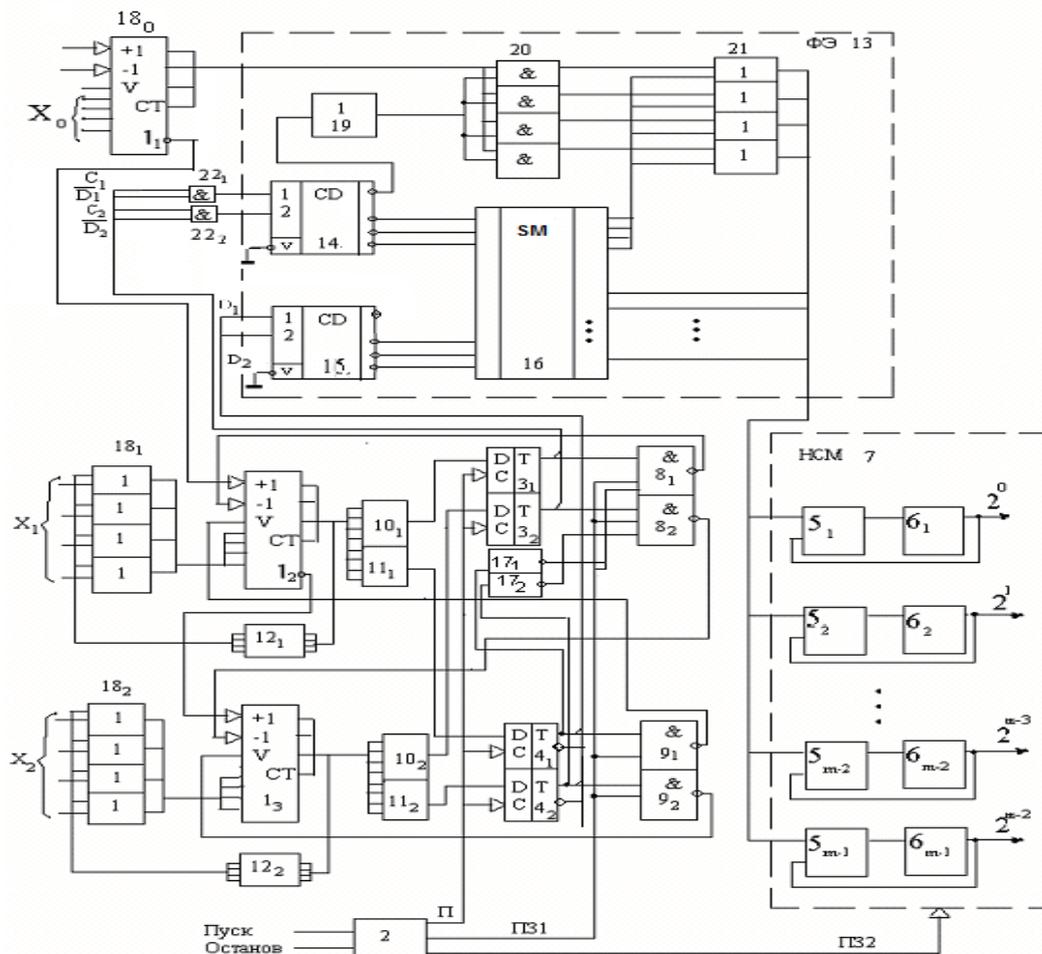


Рисунок 1. Структура двухшагового ПК НКЭ с параллельной стратегией

Закон функционирования формирователей эквивалентов двухшагового ПК НКЭ для $n=3$ и $K=12$ приведен в табл.1.

Таблица 1

N набора	Состояние триггеров		Общий вид эквивалента	Десятичный код эквивалента	Двоичный код эквивалента		
	Второй группы	Первой группы			$y_{12}y_{11}y_{10}y_9$	$y_8y_7y_6y_5$	$y_4y_3y_2y_1$
Z_i	$D_3D_2D_1$	$C_3C_2C_1$	S	S_{10}	Трансляция младшей тетрады		
0	000	000	X_0	X_0	Трансляция младшей тетрады		
1	000	001	K^1	12	0000	000	1100
2	000	010	K^2	144	0000	1001	0000
3	000	011	K^2+K^1	156	0000	1001	1100
4	000	100	K^3	1728	0110	1100	0000
5	000	101	K^3+K^1	1740	0110	1100	1100
6	000	110	K^3+K^2	1872	0111	0101	0000
7	000	111	$K^3+K^2+K^1$	1884	0111	0101	1100
8	001	001	aK	24	0000	0001	1000
9	001	011	K^2+aK	168	0000	1010	1000
10	001	101	K^3+aK	1752	0110	1101	1000
11	001	111	K^3+K^2+aK	1896	0111	0110	1000
12	010	010	aK^2	288	0001	0010	0000

13	010	011	$aK^2 + K$	300	0001	0010	1100
14	010	110	$K^3 + aK^2$	2016	0111	1110	0000
15	010	111	$K^3 + aK^2 + K$	2028	0111	1110	1100
16	011	011	$aK^2 + aK$	312	0001	0011	1000
17	011	111	$K^3 + aK^2 + aK$	2040	0111	1111	1000
18	100	100	aK^3	3456	1101	1000	0000
19	100	101	$aK^3 + K$	3468	1101	1000	1100
20	100	110	$aK^3 + K^2$	3600	1110	0001	0000
21	100	111	$aK^3 + K^2 + K$	3612	1110	0001	1100
22	101	101	$aK^3 + aK$	3480	1101	1001	1000
23	101	111	$aK^3 + K^2 + aK$	3624	1110	0010	1000
24	110	110	$aK^3 + aK^2$	3744	1110	1010	0000
25	110	111	$aK^3 + aK^2 + K$	3756	1110	1010	1100
26	111	111	$aK^3 + aK^2 + aK$	3768	1110	1011	1000

Функционирование программы в режиме статистика

После активации режима “СТАТИСТИКА” в созданном программном средстве для анализа преобразований чисел в преобразователях кодов параллельного типа [3] появляется окно этого режима. В этом окне имеется пять текстовых полей для ввода данных, три из которых снабжены кнопками инкремента и декремента. С помощью этих кнопок следует задать значение основания, количество преобразуемых цифр, число шагов, величину шагов.

Когда все значения введены, следует нажать поле “Собрать данные”. Программа после вычисления отобразит значения математического ожидания, дисперсии, количества всех проанализированных чисел и распределение количеств чисел по числу тактов преобразования, на основании которого можно построить гистограмму распределения.

Результат работы программного средства в режиме “СТАТИСТИКА” для $K=10$ и $n=6$ приведен на рис. 2.

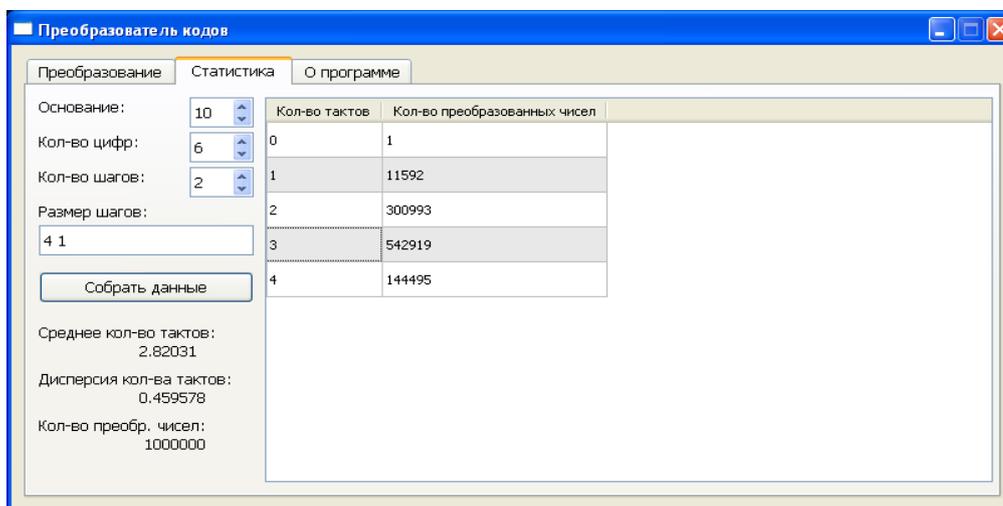


Рисунок 2. Результаты статистических расчетов для $K=10$ и $n=6$.

Для сравнения результатов статистики при тех же значениях $K=10$; $n=6$ для последовательной стратегии использования шагов с помощью программного средства “CONVERTOR” получены

аналогичные статистические данные. Результаты статистики для обеих стратегий с целью сравнения сведены в табл.2.

Таблица 2

Число тактов	Тип стратегии	
	Последовательная	Параллельная
0	1	1
1	126	11 592
2	5 299	300 993
3	87 157	542 919
4	385 049	144 495
5	522 368	

В основной части табл.2. приведено распределение количеств чисел по числу тактов преобразования. Одно число {000 000} преобразуется за 0 тактов; общее количество чисел составляет $N=10^6$. Статистические данные для $M_{\text{посл}}$; $D_{\text{посл}}$; $M_{\text{пар}}$; $D_{\text{пар}}$; а также значения коэффициента $\gamma = M_{\text{пар}} / M_{\text{посл}}$ для ряда оснований $K=3 - 12$ приведены в табл. 3 .

Имеется возможность задавать различное число шагов преобразования - от 1 до 8, основание

системы счисления на входе преобразователя – от 3 до 15, разрядность чисел – от 2 до 12, веса шагов преобразователя. Кроме этого данный режим позволяет вручную задавать набор преобразуемых чисел или автоматически на выбор. При автоматическом формировании чисел программа делает полный перебор всех возможных значений в диапазоне от 0 до $n-1$, где n – разрядность преобразуемых чисел.

Таблица 3

К	3	5	6	7	9	10	11	12
А	2	4	4	4	4	4	4	4
$M_{\text{посл}}$	1,82	2,19	3,49	3,53	4,25	4,42	4,52	4,72
$a_{\text{посл}}$	0,15	0,23	0,46	0,33	0,46	0,25	0,37	0,27
$M_{\text{паралл}}$	0,998	1,78	1,823	2,534	2,643	2,82	3,334	4,012
$a_{\text{паралл}}$	0,146	1,725	0,289	0,446	0,811	0,46	0,601	1,026
γ	0,548	0,729	0,521	0,882	0,626	0,638	0,737	0,85

Математическое ожидание M рассчитывается по формуле (2):

$$M = \left(\sum_{i=0}^{i=N_{\text{max}}} i \cdot N_i \right) / 2^n \quad (2)$$

где M — математическое ожидание числа тактов преобразования i ; N_i — количество чисел, преобразуемых за i тактов; N_{max} — максимальное значение числа тактов преобразования (зависит от основания системы счисления K и значений шагов преобразования a, b, c); n — число входных преобразуемых разрядов.

Затем рассчитывается дисперсия преобразования D по формуле (3):

$$D = \left(\sum_{j=1}^{j=2^n} (M - N_j)^2 \right) / 2^n (2^{n-1}) \quad (3)$$

N_j — количество тактов, за которое преобразуется число Aa_j .

Анализ табл.3 показывает, что параллельная стратегия использования шагов дает существенный выигрыш по быстродействию в 35%-45% для $K=3-10$ и 15% для $K=12$.

Выводы:

1. Рассмотрено функционирование преобразователя кодов по методу накопления эквивалентов с применением параллельной стратегией использования шагов преобразования, что по сравнению с последовательной стратегией позволяет в двухшаговом параллельном ПК сократить число тактов преобразования ее с 5-ти до 4-х (повышать быстродействие на 20%, а в трехшаговом параллельном ПК сократить число тактов преобразования с 4-х до 3-х (повышать быстродействие на 25%).

2. Предложено программное средство CONVERTOR, которое позволяет выполнять построение таблиц и анализ затрат для ПК с параллельной стратегией.

3. Программное средство CONVERTOR позволяет проводить детальный анализ этапа систем-

ного проектирования ПК параллельного типа, сократить аппаратные затраты на реализацию всего ПК за счет нахождения оптимального разбиения на блоки, сократить число тактов преобразования за счет параллельной стратегии.

Список литературы:

1. Какурин Н.Я., Вареца В.В., Коваленко С.Н. Параллельная стратегия использования шагов в двухшаговых преобразователях кодов //АСУ и приборостроения. 2007. Вып.141. С.29-36.
2. Какурин Н.Я., Вареца В.В., Коваленко С.Н. Структуры формирователей эквивалентов для преобразователей кодов с параллельным использованием шагов преобразования //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008.- №5-6.-С.66-70.
3. Какурин Н.Я., Бочаров Е.В., Вареца В.В., Полежаев К.В., Замалеев Ю.С. Программное средство для анализа преобразований чисел в преобразователях кодов параллельного типа //АСУ и приборостроения. 2011. Вып.154. С.83-90.
4. Патент на корисну модель №71361 Україна. Регістр зсуву / Какурін М.Я., Лопухін Ю.В., Хаханов В.І., Вареца В.В., Макаренко Г.М; Харківський національний університет радіоелектроніки – № u201115706; заявл. 30.12.2011; опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13/2012.
5. Патент на корисну модель №83310 Україна. Реверсивний регістр зсуву / Какурін М.Я., Хаханов В.І., Литвинова Є.І., Вареца В.В., Макаренко Г.М; Харківський національний університет радіоелектроніки – № u201303681; заявл. 26.03.2013; опубл. 10.09.2013. – Бюл. № 17/2013.
6. Патент на корисну модель №90665 Україна. Реверсивний регістр зсуву / Какурін М.Я., Хаханов В.І., Литвинова Є.І., Вареца В.В., Макаренко Г.М; Харківський національний університет радіоелектроніки – № u201313940; заявл. 02.12.2013; опубл. 10.06.2014. – Бюл. № 11/2014.
7. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 816с.

Vasylyev V. I.*PhD (technical sciences), Senior Lecturer, Sumy State University;***Vasylyev E. V.***engineer, programmer*

OPTIMAL CONTROL OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS

Васильев В.И.*к.т.н., ст. преподаватель, Сумский государственный университет***Васильев Е.В.***инженер, программист*

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

The method of optimal multi-coordinate control of complex dynamic systems and high-precision positioning systems is proposed. Its field of application is high-speed open and closed static and astatic systems. The control is carried out by a set of dynamic coordinates: the main coordinate of the motion and its derivatives. Control parameters are calculated based on the frequency properties of the system and the dynamic properties of the drive. The results of computer simulation of the dynamic properties of systems and their comparison for some control methods are presented. The result of optimal control of a structurally unstable astatic system under conditions of deviation of design parameters from nominal up to 2 times is presented. The method can be used in systems of autopilot and stabilization of supersonic and hypersonic high maneuverable unmanned aerial vehicles and rocket systems.

Предложен способ оптимального многокоординатного управления сложными динамическими системами и системами высокоточного позиционирования. Область его применения – быстродействующие разомкнутые и замкнутые, статические и астатические системы. Управление осуществляется совокупностью динамических координат: основной координаты движения и ее производных. Параметры управления рассчитываются на основе частотных параметров системы и динамических параметров привода. Представлены результаты компьютерного моделирования динамических свойств систем и их сравнение для некоторых способов управления. Представлен результат оптимального управления структурно неустойчивой астатической системой в условиях отклонения расчетных параметров от номинальных до 2 раз. Способ может использоваться в системах автопилотирования и стабилизации сверх- и гиперзвуковых высокоманевренных беспилотных летательных аппаратов и ракетных систем.

Keywords: optimization of control, limiting dynamic coordinates, system frequency parameters, transfer function poles, structural stability and astatism.

Ключевые слова: оптимальное управление, ограничение динамических координат, частотные параметры системы, полюсы передаточной функции, структурная устойчивость и астатизм.

Суть проблемы. Анализ последних исследований и публикаций.

Под оптимальным динамическим режимом сложных систем понимают отсутствие внутренних механических колебаний в переходных режимах [1,2,3]. Процесс управления принято считать оптимальным по динамическим свойствам, если при ступенчатом управляющем воздействии системой обеспечивается монотонный переход в заданное состояние за минимальное время.

Высокоточные и высокоманевренные системы требуют качества управления, соответствующего их динамическим характеристикам. Эта проблема особо актуальна для систем стабилизации и управления современными сверх- и гиперзвуковыми беспилотными летательными аппаратами.

Известно, что точность систем обеспечивается астатическим регулированием, при этом порядок астатизма регулятора определяет степень точности системы. Но повышение порядка астатизма системы ухудшает качественные показатели управления системой. Это объясняется тем, что фазовая характеристика исходной разомкнутой системы с

астатизмом второго порядка в области низких частот начинается со значения $-\pi$, а апериодические и колебательные элементы остальной части системы только увеличивают фазовые отставания в области средних и высоких частот. Т.е. у таких систем фазовое отставание на любой частоте всегда будет больше $-\pi$ и повышение порядка астатизма только ухудшит их качество. По критерию Найквиста это структурно неустойчивые системы, которые могут стать управляемыми при рациональном перераспределении полюсов и нулей системы. Такие способы известны, например, введение соответствующих фазовых сдвигов в амплитудно-фазовую характеристику системы или другие методы коррекции [2,3,4]. Из-за указанных сложностей, системы с астатизмом 2-го порядка и выше на практике используют редко.

В данной статье описан способ управления системами со сложной динамикой, методика которого предусматривает аппроксимацию математического описания системы через первичные динамические параметры моделью в параметрах ее вторичных, частотных свойств колебаний первой гармоники, которая в основном определяет свойства системы

[5,6]. Модель адекватно и достаточно точно описывает динамические свойства системы, при этом частотами высших гармоник можно пренебречь, которые по амплитуде и по времени демпфирования, оказывают значительно меньшее влияние.

В последнее время появились публикации, предлагающие подобные методы математического описания динамических систем на основе элементов квантово-волнового дуализма [7,8,9]. Развитие методов компьютерного моделирования систем и их свойств, предоставили возможность оценки адекватности метода аппроксимации элементами квантово-волнового дуализма для синтеза оптимального управления сложными системами.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.

Очевидно, что решения задач представленных выше связаны с проблемой устойчивости и улучшением качества переходного процесса системы. В соответствии с [3] качество управления обеспечивается запасом устойчивости (демпфированием) системы, улучшением ее амплитудно-частотных характеристик. Компенсация фазовых сдвигов, вносимых интегрирующими устройствами регулятора, является одним из способов, который предусматривает введение в функцию управления вместе с воздействием на основную координату движения, ее производной. Однако на практике это реализовать сложно, потому что для предотвращения реактивных процессов в переходных режимах должны контролироваться изменения многих параметров системы в процессе движения.

Синтез эффективных способов управления техническими системами со сложной динамикой осуществляется на основе математических описаний свойств системы, компьютерного моделирования, его анализа, оценки результата, поиска решений и резервов эффективности.

Наиболее точные описания систем обеспечиваются детерминированными моделями, описывающими строгую зависимость показателей от влияния изменений параметров и факторов. Так, математическая формула с соответствующими значениями аргументов и факторов объекта обеспечивает определение конкретных значений его состояния. Примерами таких зависимостей являются формулы законов фундаментальных и специальных наук. Качественно разработанные модели с максимально возможным учетом параметров могут стать основой для исследований и оптимизации технических систем.

Цель статьи.

Предлагаются технические решения для обеспечения оптимального по быстродействию и точности позиционирования управления сложными системами. Управление осуществляется совокупностью поочередно изменяющихся воздействий на основную координату движения и через нее на координаты ее производных. Параметры воздействий определяются заданным законом управления с учетом динамических свойств привода и частотных параметров системы.

Представлен алгоритм последовательности действий способа, описание его работы, а методами компьютерного моделирования результаты его применения. В частности, исследованы:

- переходные характеристики сложных систем с упругими связями и астатических систем;
- сравнительный анализ динамических характеристик систем и их ресурсов, при использовании известных и предлагаемого метода оптимизации при отклонениях расчетных частотных параметров от номинальных до $\pm 50\%$;
- точность и демпфирующие свойства при управлении сложной системой 5-го порядка с 2-м порядком астатизма в условиях действий случайных внешних возмущений и отклонении расчетных параметров системы от номинальных в 2 раза.

Изложение основного материала.

В сложных и много массовых системах оптимизацию управления осуществляют по основной частоте собственных колебаний и при линейных управляющих воздействиях во времени, кратном периоду колебаний системы переходные процессы будут иметь монотонный характер [1]. Например, на упругую систему, представленную на рисунке 1 действует внешняя сила F , которая вызывает перемещение x массы m . Согласно второму закону Ньютона с учетом динамических свойств уравнение движения механической системы:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(t) - c_{df} \frac{dx}{dt} - c_k x \quad (1)$$

где m , c_k , c_{df} , S – масса, коэффициенты жесткости и сопротивления, оператор дифференцирования, F , x , $x1$, T , t – усилие воздействия, перемещение, реакция системы на короткий импульс усилия, период, время.

Нормализованное дифференциальное уравнение системы:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c_{df} \frac{dx}{dt} + c_k x = F(t) \quad (2)$$

Применив преобразование Лапласа-Карсона, используя соответствие операции дифференцирования $s \rightarrow \frac{d}{dt}$ перейдем к операторной форме:

$$[ms^2 + c_{df}s + c_k]X(s) = F(s) \quad (3)$$

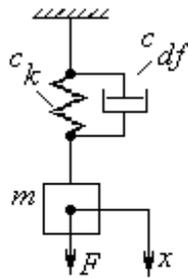
Полученное уравнение представим в виде передаточной функции системы, соотношением операторных изображений выходной переменной к входной при нулевых начальных условиях и представим передаточную функцию в удобном для моделирования виде

$$W(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{c_k^{-1}}{mc_k^{-1}s^2 + c_{df}c_k^{-1}s + 1} = \frac{c_k^{-1}}{T_1 T_2 s^2 + T_2 s + 1} \quad (4)$$

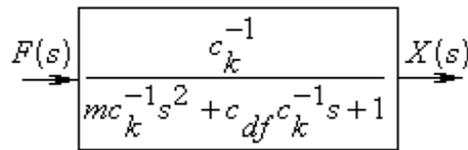
где

$$T_1 T_2 = m c_k^{-1}, T_2 = c_{df} c_k^{-1}, T_1 = m c_{df}^{-1}$$

При управляющем воздействии на систему по линейному закону за время, кратное периоду собственных колебаний, переходной процесс будет иметь монотонный характер, как это показано на рисунке 1. Обозначены, m, c_k, c_{df}, S – масса,



a



b

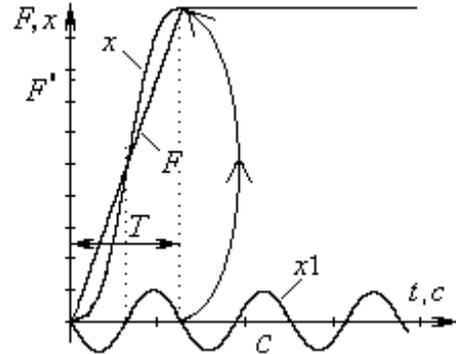


Рис. 1. Система с упругими свойствами (a), ее математическая модель – передаточная функция (b) и переходные функции при дельтаобразном и линейном воздействии в течение периода колебаний (c).

Недостатком такого способа являются область применения, ограниченная системами с быстродействием, соизмеримым периоду собственных колебаний и необходимость постоянного контроля времени периода, например, для критических по времени режимов [10,12]. Более эффективное демпфирование обеспечивается применением ПИ- и ПИД-регуляторов [2,3,4] для коррекции амплитудно-частотных свойств и полосы пропускания системы. При этом обеспечивается рациональное перераспределение нулей и полюсов передаточной функции системы, что компенсирует инерционность системы.

Оптимальный по динамическим свойствам переходной процесс может быть обеспечен поочередными изменениями воздействий на динамические координаты системы до достижения ими ограничений. При этом ограничения необходимы для согласования динамических возможностей привода с инерционными свойствами управляемой системы. Тогда переходы системы в новые состояния будут обеспечиваться чередующимися изменениями воздействий координат до достижения ими ограничений, начиная с высшей производной и заканчивая управляемой координатой. Например, рывок, ускорение, скорость, перемещение.

Практическую реализацию описанного алгоритма осуществляет способ оптимального управления системами со сложной динамикой, технические решения которого защищены патентами [5,6].

Идея способа заключается в воздействии на управляемую координату движения системы (например, скорость), а также, на приведенные к ней координаты ее производных (например, ускорение, рывок). Управляющие воздействия при этом определяются на основании частотных параметров системы и динамических свойств привода.

коэффициенты жесткости и сопротивления, оператор дифференцирования; F, x – сила воздействия, перемещение, $x1$ – реакция системы на короткий дельтаобразный импульс усилия F' , T, t – период, время.

Поскольку, как указано выше, в сложных и много массовых системах оптимизацию осуществляют по основной частоте собственных колебаний, то другой особенностью способа является аппроксимация дифференциального уравнения системы, составленного на основании ее динамических параметров, математическим описанием переходного процесса системы на основной частоте. Любой затухающий колебательный процесс математически может быть представлен дифференциальным уравнением второго порядка. Такая аппроксимация, дает возможность заменить первичные динамические параметры дифференциального уравнения (массы, коэффициенты жесткости и трения) вторичными, физическая природа которых может быть описана математически. Например, переходной процесс колебательного звена второго порядка, приведенного на рисунке 1, может быть представлен математическим описанием затухающей синусоидальной функции с известными частотными параметрами. Описание его в операторной форме обеспечит, хорошую адекватность моделирования динамических свойств системы.

С учетом принятых ограничений динамических координат и естественных связей между действиями технической результат способа заключается в повышении быстродействия, энергетической эффективности, минимизации динамических перегрузок. Областью применения способа являются сложные динамические системы высокого порядка инерционности. Например, управление системами с протяженной трансмиссией, в том числе и в критических режимах, предохранительным торможением лифтов и подъемников глубоких шахт, буровыми установками, конвейерами. Способ может быть полезен для систем, описываемых детерминированными моделями, например, в медицине, экономике.

Технические решения способа могут быть применены для управления и стабилизации быстродействующими системами высокоточного позиционирования, в частности, автоматическими телевизионными камерами на спортивных соревнованиях, остронаправленными антеннами, автопилотами [11] со статическими и астатическими системами регулирования (в т.ч. структурно неустойчивыми с астатизмом 2-го порядка и выше). Для управления современными беспилотными высокоманевренными транс-, сверх- и гиперзвуковыми летательными аппаратами.

Реализация способа представлена блок-схемой алгоритма последовательности действий, которая приведена на рисунке 2. Для достижения поставленной цели алгоритмом предусмотрены следующие действия: 1) задание функции управления и расчетных параметров; 2) задание констант, коэффициентов и ограничений $K_c, U_{cm}, U_{lm}, \delta$; 3) вычисление рассогласования $D(t) = U_c(t) - y(t) - K_o U'_{out}(t)$ между заданной функцией управления и совокупностью изменений управляемой динамической координаты $y(t)$ и вычисленной в блоке 5 ее первой производной во времени, приведенной к управляемой координате коэффициентом, учитывающей частотные

параметры системы; 4) вычисление параметров и формирование функции-координаты второй производной от управляемой координаты движения системы с ограничением ее по амплитуде в соответствии с динамическими свойствами привода; 5) вычисление функции-координаты первой производной $U'_{out}(t) = 2\alpha \int U''_{out}(t) dt$ от управляемой координаты движения системы; 6) вычисление (моделирование) управляемой координаты движения системы

$$U_{out}(t) = \frac{\omega^2 + \alpha^2}{2\alpha} \int U'_{out}(t) dt, \quad \text{где}$$

$\omega = 2\pi/T$ – частота, T – период собственных колебаний системы, $\alpha = |\lg(1 - A_1 / y_0) / T|$ –

коэффициент демпфирования, A_1 / y_0 – отношение отрицательной амплитуды второго периода колебаний к установившемуся значению выходной переменной; 7) вычисление закона воздействия на систему $U_s(t) = U_{out}(t) + U'_{out}(t) + U''_{out}(t)$; 8) контроль управляемой координаты движения системы $y(t)$.

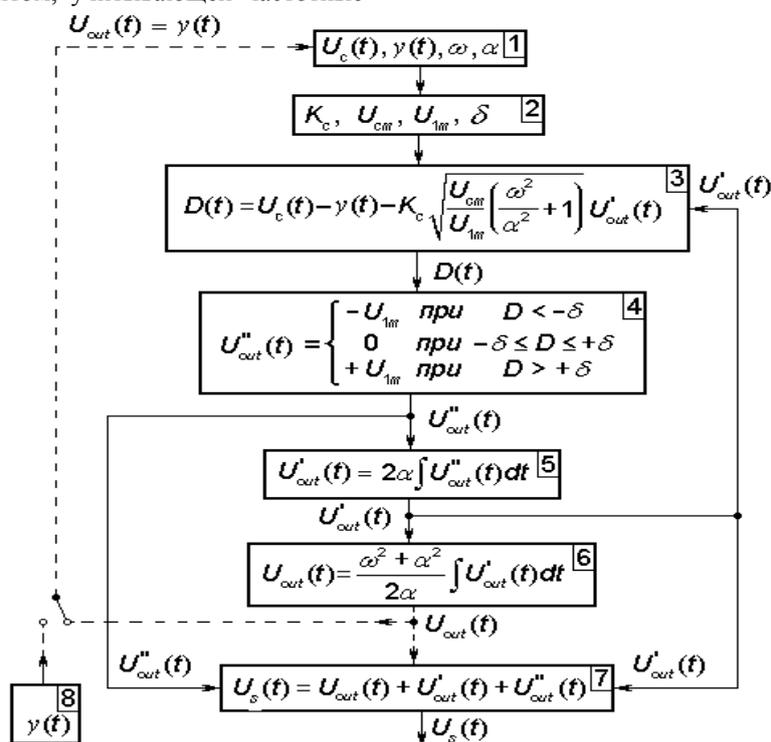


Рис. 2. Блок-схема алгоритма способа многокоординатного управления системой со сложной динамикой.

Блок 8 применяется при реализации способа многокоординатного управления в замкнутой системе управления, при контроле управляемой координаты (например, позиционирования) с помощью

датчика, GPS-технологий, квантовых акселерометров и т.п. При разомкнутом управлении используется $U_{out}(t) \approx y(t)$, что моделируется блоком 6.

Алгоритмом способа предусмотрено выполнение следующих действий. В соответствии с заданным законом управления $U_c(t)$ вычисляется сигнал интегрирования

$$U''_{out}(t) = \begin{cases} -U_{1m} & \text{при } D < -\delta \\ 0 & \text{при } -\delta \leq D \leq +\delta \\ +U_{1m} & \text{при } D > +\delta \end{cases},$$

который определяется путем нелинейного усиления с ограничением по амплитуде функции рассогласования

$D(t) = U_c(t) - y(t) - K_o U'_{out}(t)$ между заданным законом управления и полученными при интегрировании функциями: координаты движения, которая управляется, и приведенной к ней че-

рез коэффициент $K_o = K_c \sqrt{\frac{U_{cm}}{U_{1m}} \left(\frac{\omega^2}{\alpha^2} + 1 \right)}$

первой производной, где D – результат сравнения мгновенных значений функции рассогласования

$D(t)$, K_c – коэффициент пропорциональности, U_{cm} – максимальное значение управляющего сигнала,

$U_{1m} = \frac{dU_p(t)}{dt} \max$ – величина ограни-

чения по амплитуде сигнала интегрирования максимальным значением производной изменения управляющего воздействия $U_p(t)$, δ – допустимая ошибка сравнения.

Функция сигнала второй производной $U''_{out}(t)$ управляющего воздействия на координату движения системы интегрируется дважды. В результате первого интегрирования вычисляется функция сигнала первой производной $U'_{out}(t)$, а в результате второго интегрирования вычисляется функция управляющего воздействия на координату движения $U_{out}(t)$. Результирующее управляющее воздействие на систему $U_s(t)$ представляет совокупность функций в виде не менее одного соответствующего сигнала, которые получаются последовательным интегрированием.

Полученные при интегрировании функции учитывают динамические характеристики привода и собственные частотные параметры системы. Коэффициенты интегрирования определяются на основе частоты собственных колебаний системы ω и коэффициента демпфирования α , которые при необходимости контролируются через сигналы датчиков ускорения, и при превышении амплитудой

выходной переменной системы критического значения $A_{кр}$ уточняются частота $\omega = 2\pi/T$ и коэффициент

демпфирования $\alpha = \left| \lg(1 - A_1 / y_0) / T \right|$, где T – период колебаний, A_1 / y_0 – отношение отрицательной амплитуды второго периода колебаний к установившемуся значению.

Реализация способа для управления инерционной системой второго порядка инерционности, представлена на рисунке 1. Применив метод переменных состояний [2,4] на основе физических па-

раметров системы, m, c_k, c_{df} – массы, коэффициентов жесткости и сопротивления представим дифференциальное уравнение системы в операторной записи. Решением его является переходная характеристика системы X_l на ступенчатое входное воздействие F , представленная на рисунке 3. Для принятых численных физических параметров упругой системы получим диаграмму затухающей синусоидальной функции, которая математически может быть аппроксимирована выражением

$$X_l(t) \approx X_{appr}(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot \exp(-\alpha t) + X_0. \quad (5)$$

Из диаграммы переходного процесса определим частотные параметры: A_m – амплитуда, $\omega = 2\pi/T$ – частота, $\alpha = \left| \lg(1 - A_1 / y_0) / T \right|$ – коэффициент демпфирования, φ – фаза, X_0 – установившееся перемещение, соответствующее величине воздействия F . Воспользуемся частотными параметрами для реализации способа многокоординатного управления системой и получим диаграмму переходного процесса $X(t)$ и диаграммы сигналов управляющих воздействий [5]. На рисунке 3 обозначены: $F(t)$ – ступенчатое управляющее воздействие на систему, $a = X''(t)$ – сигнал управляющего воздействия на координату второй производной от координаты движения системы, $b = X'(t)$ – то же на координату первой производной, $c = X(t)$ – сигнал управляющего воздействия на координату движения, $d = c + b + a = X_s(t)$ – результирующее управляющее воздействие на систему, $X_0(t)$ – установившееся состояние системы.

Диаграммы получены для двух вариантов моделирования динамики системы: 1) по первичным физическим параметрам: m – приведенная к приво-ду масса движущихся частей, $c = c_{df}$ – коэффициент сопротивления, $k = c_k$ – жесткость упругой части системы; 2) по частотным параметрам системы: T – период собственных колебаний,

ω – круговая частота, α – коэффициент демпфирования. В общем случае математическое описание

системы может быть аппроксимировано описанием ее свойств на основной частоте. Потому, применив преобразование Лапласа-Карсона, получим:

$$\frac{Y(p)}{F(p)} = \frac{e_m p^m + e_{m-1} p^{m-1} + \dots + e_1 p + e_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} \approx \frac{\omega \cdot A \cdot \cos \varphi}{(p + \alpha)^2 + \omega^2} + \frac{(p + \alpha) \cdot A \cdot \sin \varphi}{(p + \alpha)^2 + \omega^2} \quad (6)$$

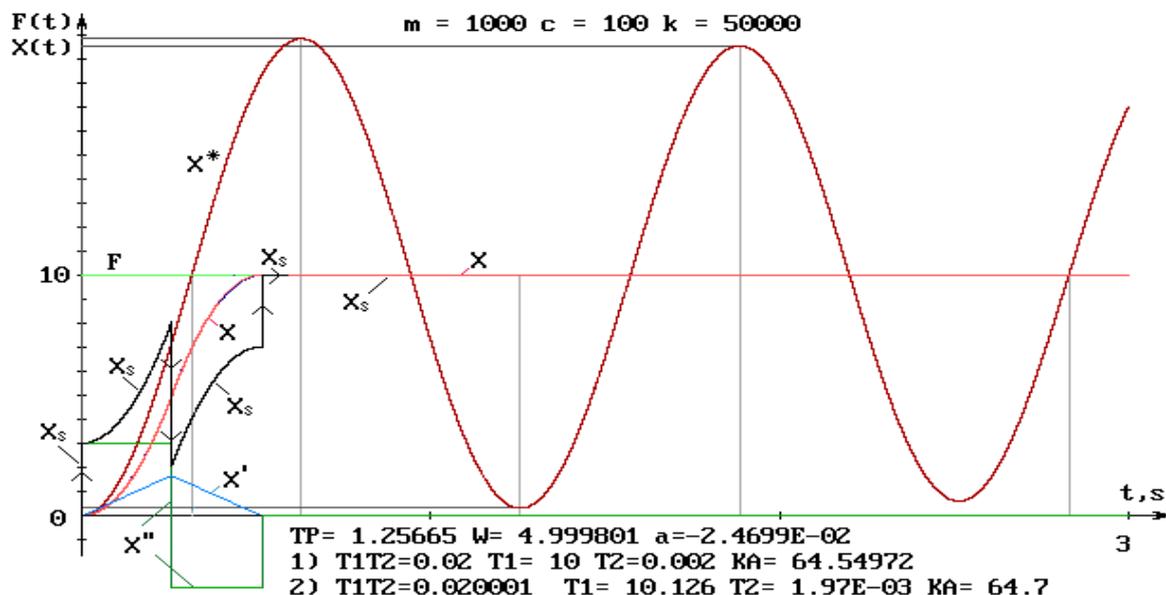


Рис. 3. Диаграммы динамических свойств системы с упругими свойствами.

Расчетные коэффициенты для обоих вариантов использования способа представлены на рисунке 3. Их соотношение при переходе от физических к частотным параметрам:

$$T_1 T_2 = \frac{m}{k} \approx \frac{0.5}{\omega^2 + \alpha^2},$$

$$T_2 = \frac{c}{k} \approx \frac{2\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}, T_1 = \frac{m}{c} \approx \frac{0.25}{\alpha}.$$

Из сравнения представленных на рисунке 3 расчетных параметров (постоянных времени и коэффициентов) по обоим вариантам, очевидно, что отличие несущественно, а диаграммы практически идентичны. Это, конечно, объяснимо идентичностью порядков дифференциального уравнения системы и ее аппроксимирующей функции. Но проведенные исследования применения способа с более сложными системами, например, [7,8], а также те, что представлены ниже, показали достаточную адекватность и точность принятого метода аппроксимации. Таким образом, многокоординатное воздействие на систему, с учетом параметров основной частоты колебаний, в совокупности с коррекцией фазовых сдвигов является эффективным демпфирующим фактором.

Диаграммы рисунка 3 показывают, что монотонному переходному процессу системы соответствуют поочередные во времени изменения координат, основной и двух ее производных, при достижении каждой своего ограничения. В соответствии

с алгоритмом на рисунке 2 ступенчатое воздействие, входным усилием $F(t)$ на систему мгновенно переводит координату второй производной $X''_{out}(t)$ до ограничения, соответствующего динамическим параметрам привода. Ее значение, начинает интегрироваться, результат которого определяет линейно изменяющуюся координату первой производной $X'_{out}(t)$. Функция ее также интегрируется и определяет изменяющуюся по параболе функцию основной координаты движения $X_{out}(t)$. Совокупное $X_s(t)$ воздействие координат на систему последовательно и монотонно переводит ее в состояние, соответствующее заданному воздействию силы $F(t)$ на систему. В процессе движения системы до достижения основной управляемой координатой своего ограничения, осуществляется очередное переключение второй производной $X''_{out}(t)$ в противоположное по знаку ограничение, определенное по времени свойствами системы и воздействия. Это обеспечивает линейно спадающее изменение первой производной $X'_{out}(t)$ до нуля, это меняет выпуклость параболы основной координаты $X_{out}(t)$ на противоположный, обеспечивается монотонное завершение процесса перехода. Основная координата достигает заданного

управлением ограничения, все производные в установившемся режиме становятся равными нулю, чередование прекращается. Если управляющее воздействие изменится, то чередования возобновятся по описанному алгоритму. В статическом режиме все производные становятся равными нулю и в соответствии с (2) $F(t) = c_k X(t)$.

Для оценки прямых показателей качества управления, обеспечиваемых способом: быстрого действия, перерегулирования, демпфирования, исследованы характеристики предлагаемых здесь технических решений для сравнения с известными способами. В частности, исследована динамика систем с упругими связями при номинальных частотных параметрах и при отклонениях расчетных параметров от номинальных на $\pm 50\%$.

Диаграммы переходных режимов систем при трех вариантах воздействия представлены на рисунке 4. Представлены варианты: *a* – при линейном изменении управляющего воздействия за время, кратное периоду собственных колебаний системы;

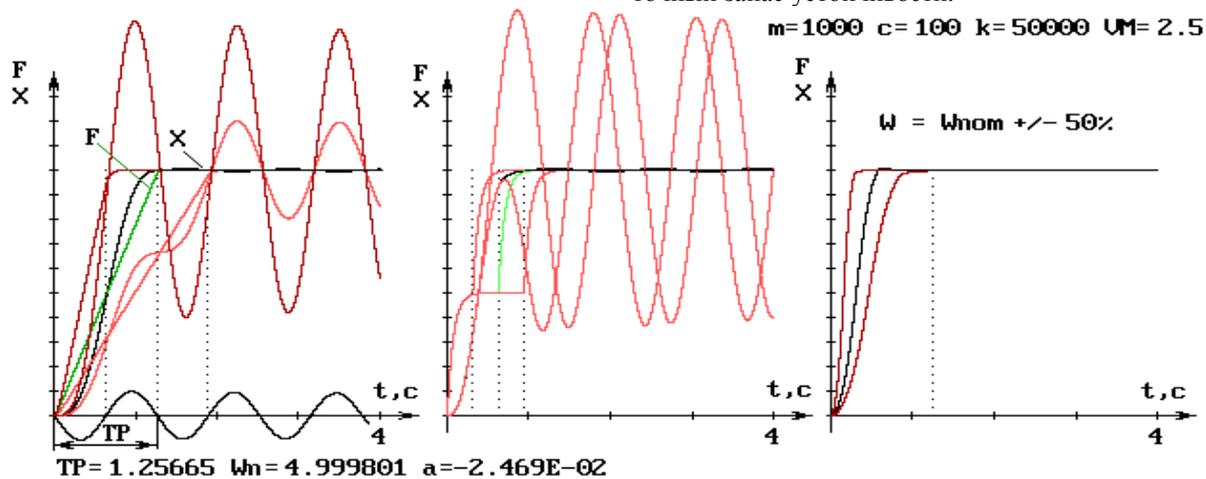


Рис. 4. Сравнение качества управления упругой системой при линейном, двухступенчатом, многокоординатном воздействиях и при отклонении расчетных частотных параметров от номинальных на $\pm 50\%$.

Результаты моделирования показывают, что предлагаемые решения соответствуют оптимальному по динамическим свойствам переходному процессу в широком диапазоне отклонения параметров частоты от номинальной и обеспечивают желаемое быстродействие системы при учете соответствующих динамических свойств привода.

Многокоординатное управление основано на более адекватном полном математическом описании и контроле динамических свойств системы, в частности, тремя динамическими координатами, что подобно точному описанию позиции точки в трехмерном пространстве. Использование в управляющем сигнале производных с фиксированными фазовыми сдвигами от основной координаты позволяют компенсировать инерционные свойства интегрирующих устройств систем с астатизмом. Это особенно важно для динамических систем высокой точности, которые кроме быстродействия должны

на диаграмме *b* – при двухступенчатом воздействии с задержкой второй ступени на полпериода колебаний системы; на диаграмме *c* – при многокоординатном управлении.

Из диаграмм видно, что, несмотря на простоту реализации первого способа, его область применения ограничена во времени периодом собственных колебаний системы и требует его точного определения в момент воздействия. Известно, что двухступенчатый метод торможения находит практическое применение в системах предохранительного торможения грузовых шахтных подъемников в тех случаях, когда его динамические характеристики не противоречили Правилам безопасной эксплуатации.

Эффективность многокоординатного управления обеспечивается оптимально определенными параметрами всех воздействий и принятыми ограничениями, согласующимися с динамическими возможностями привода, что позволяет получить необходимое качество динамики процесса и достаточный запас устойчивости.

обеспечить нулевую ошибку. Системы автоматического управления, в состав регулятора которых входят интегрирующие устройства являются астатическими, ошибка регулирования у них, как по управляющему воздействию, так и по внешнему возмущению равна нулю. При этом порядок астатизма улучшает точность системы в динамике, но в то же время увеличение полюсов передаточной функции ухудшает динамические качества системы. Для демпфирования системы применяют различные классические методы, в том числе и вводят фазовые сдвиги [2,3].

Реализация способа на примере управления астатической системой 3-го порядка со 2-м порядком астатизма представлена на рисунках 5 и 6. Такие системы в соответствии с критерием Найквиста структурно неустойчивы при любом значении коэффициента передачи.

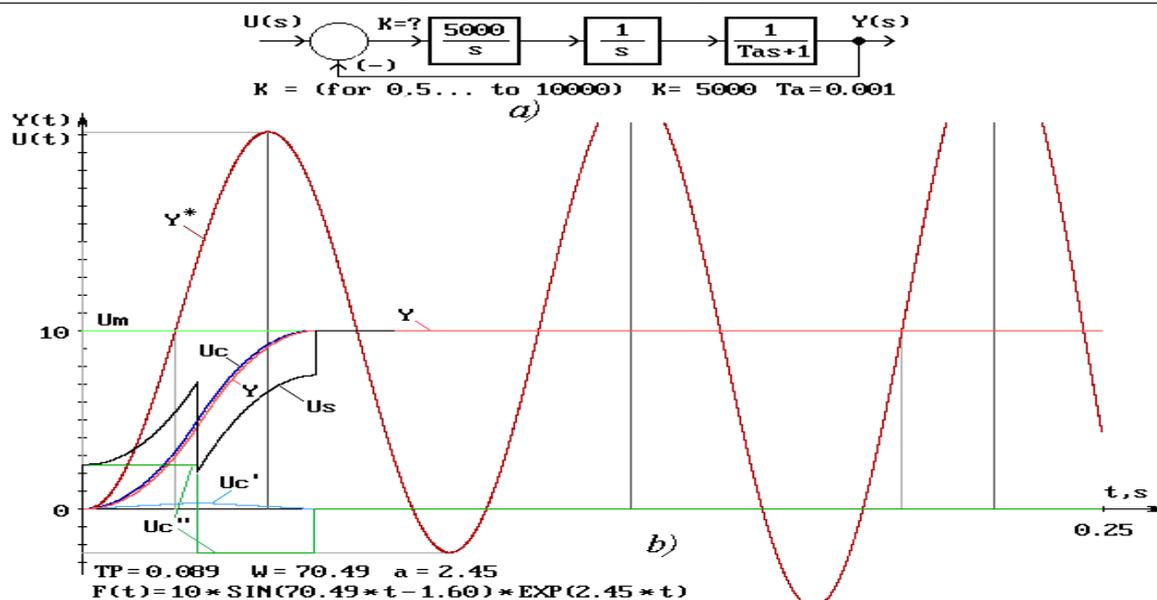
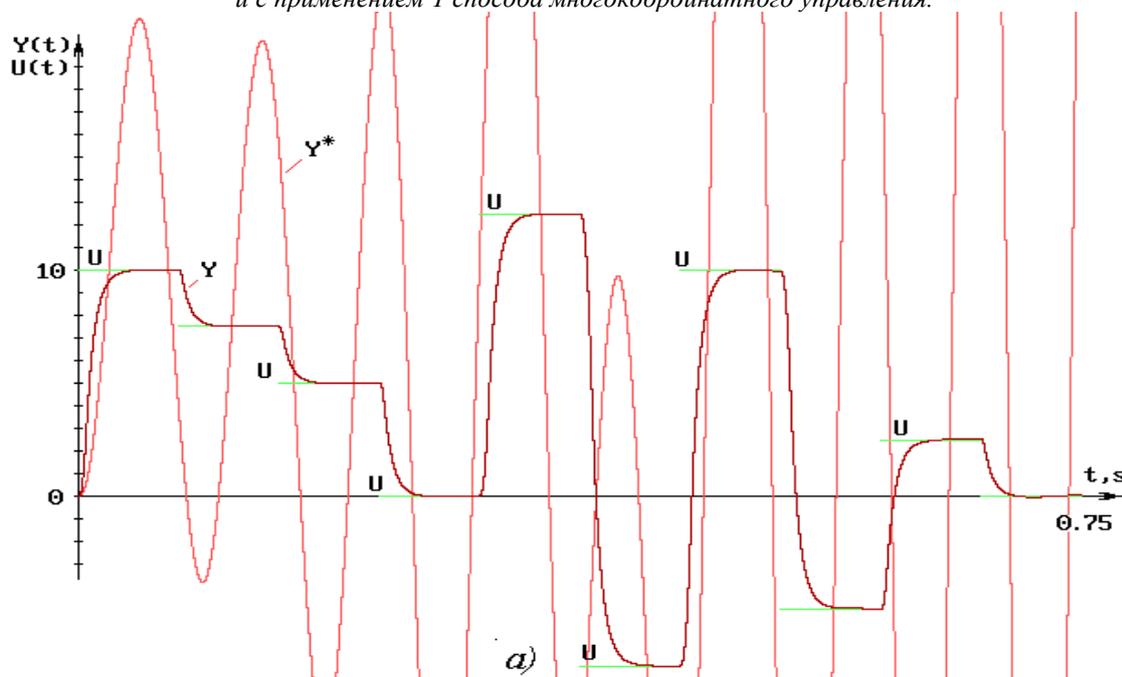


Рис. 5. Система 3-го порядка с астатизмом 2-го порядка: а) структурная схема системы; б) диаграммы переходных процессов, без применения Y^* и с применением Y способа многокоординатного управления.



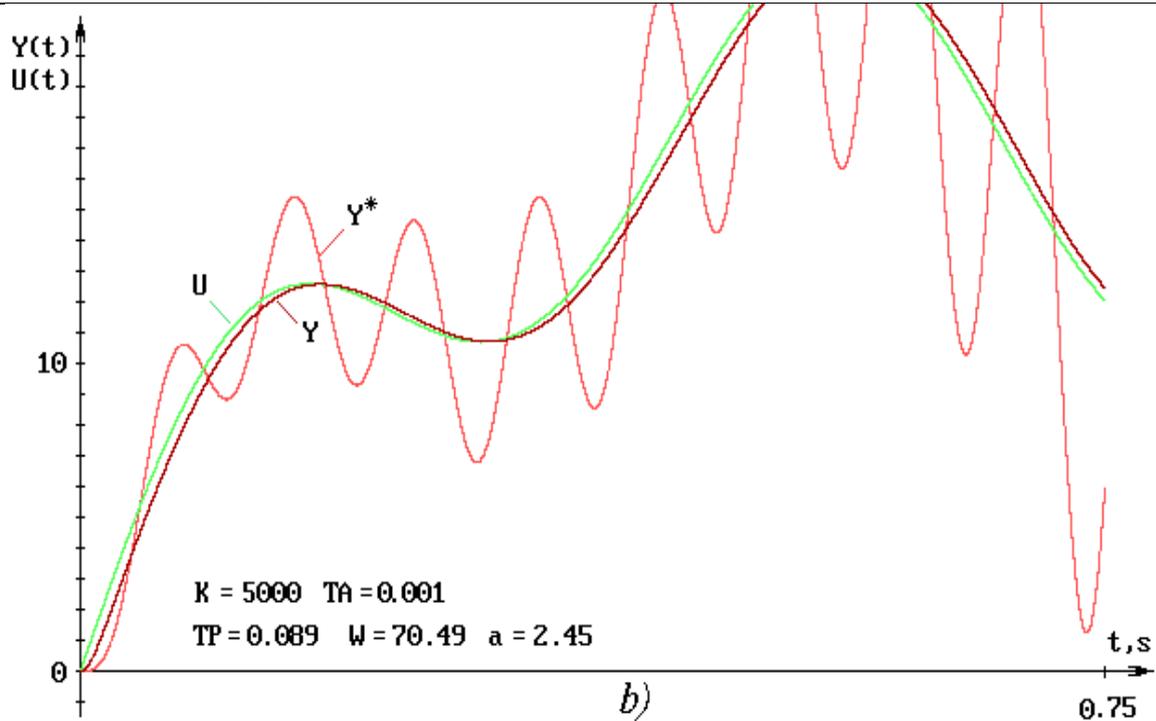
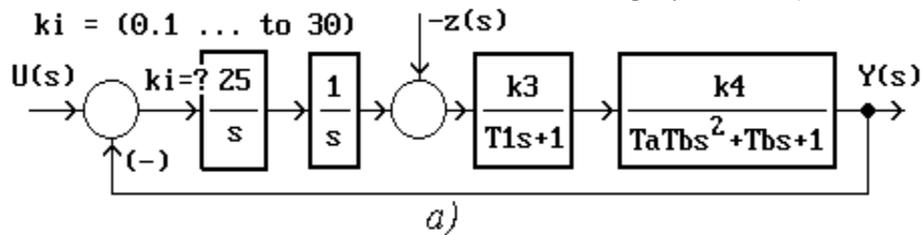


Рис. 6. Диаграммы динамических свойств системы, представленной на рисунке 5а:
 а) при переменных по знаку и величине ступенчатых управляющих воздействиях,
 б) при плавно меняющемся управляющем воздействии.

В технических решениях способа [5,6] фазовые сдвиги автоматически включаются в структуру управляющей функции, воздействующей на основную координату движения и через нее на координаты первой и второй ее производных. При этом параметры формируемого управляющего сигнала определяются заданной функцией управления, частотными свойствами системы и динамическими –

привода. Такое управление эффективно компенсирует инерционность системы. Моделирование применения способа для оценки качества и устойчивости системы при управляющих воздействиях и внешних возмущениях на замкнутую по основной координате систему 5-го порядка со 2-м порядком астатизма в условиях отклонений расчетных частотных параметров от номинальных в 2 раза представлены на рисунках 7(а-с).



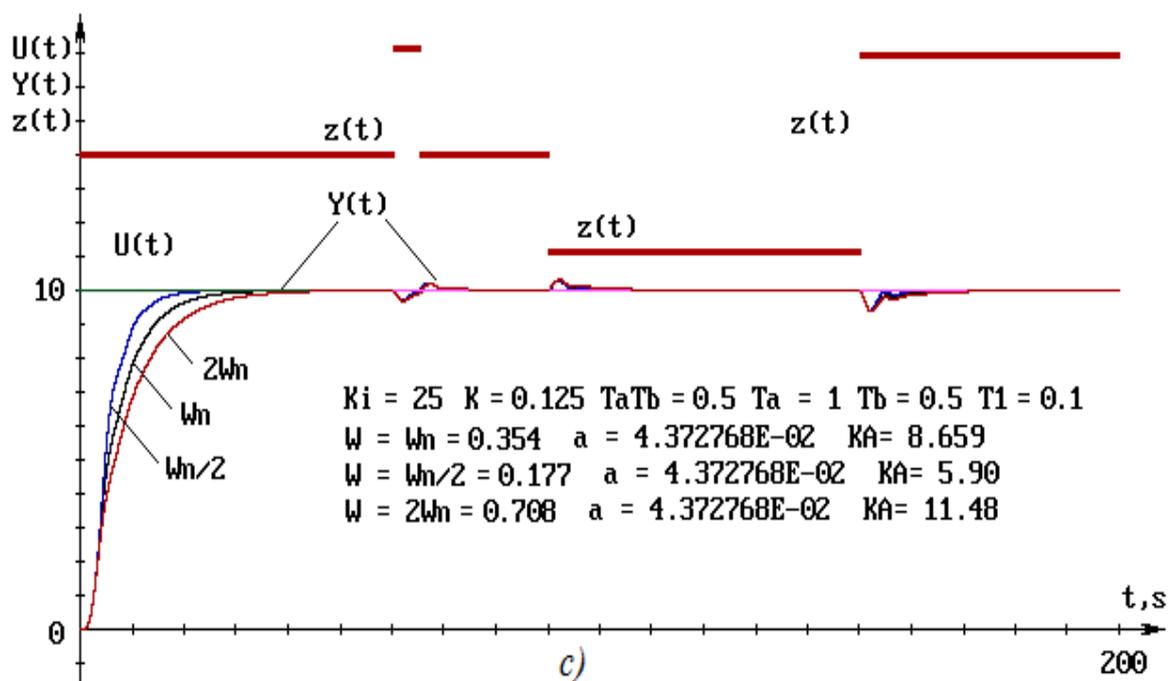
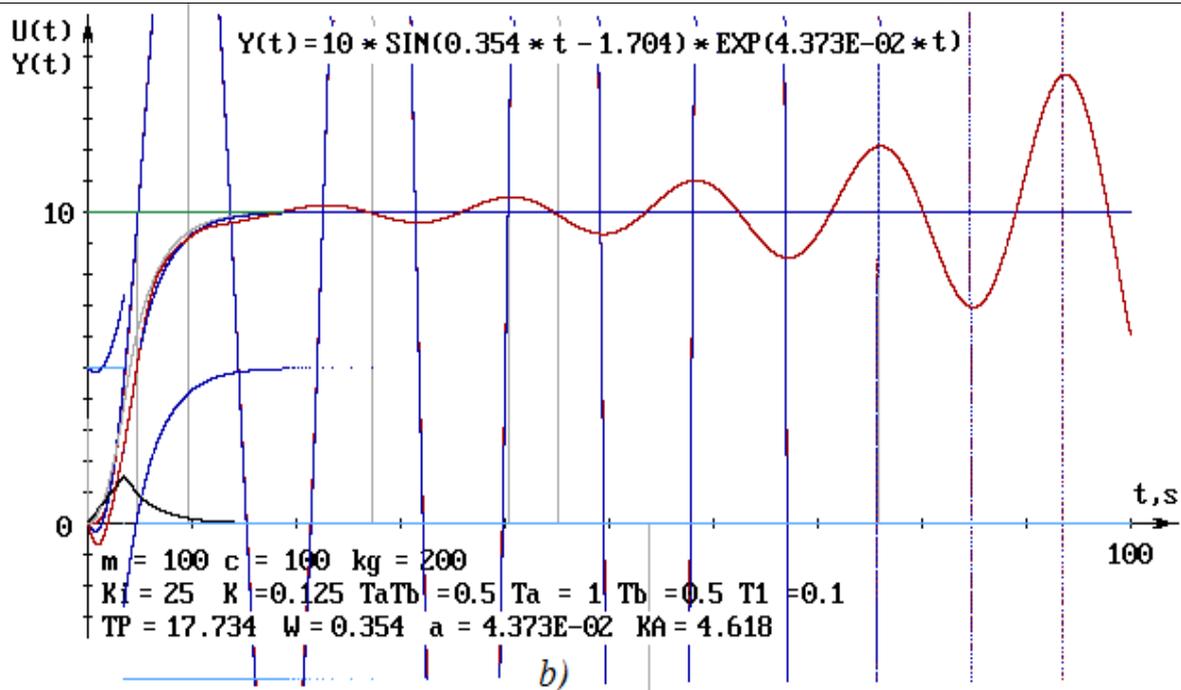


Рис. 7 – Моделирование способа управления для оценки качества и точности системы:
 а) структурная схема моделируемой системы (порядок инерционности – 5-й, астатизма – 2-й) с управляющими – $U(t)$ и возмущающими – $z(t)$ воздействиями;
 б) – переходные характеристики системы в разомкнутом состоянии;
 в) – переходные характеристики в условиях ступенчатого внешнего воздействия z при двукратных отклонениях расчетной частоты системы от номинальной.

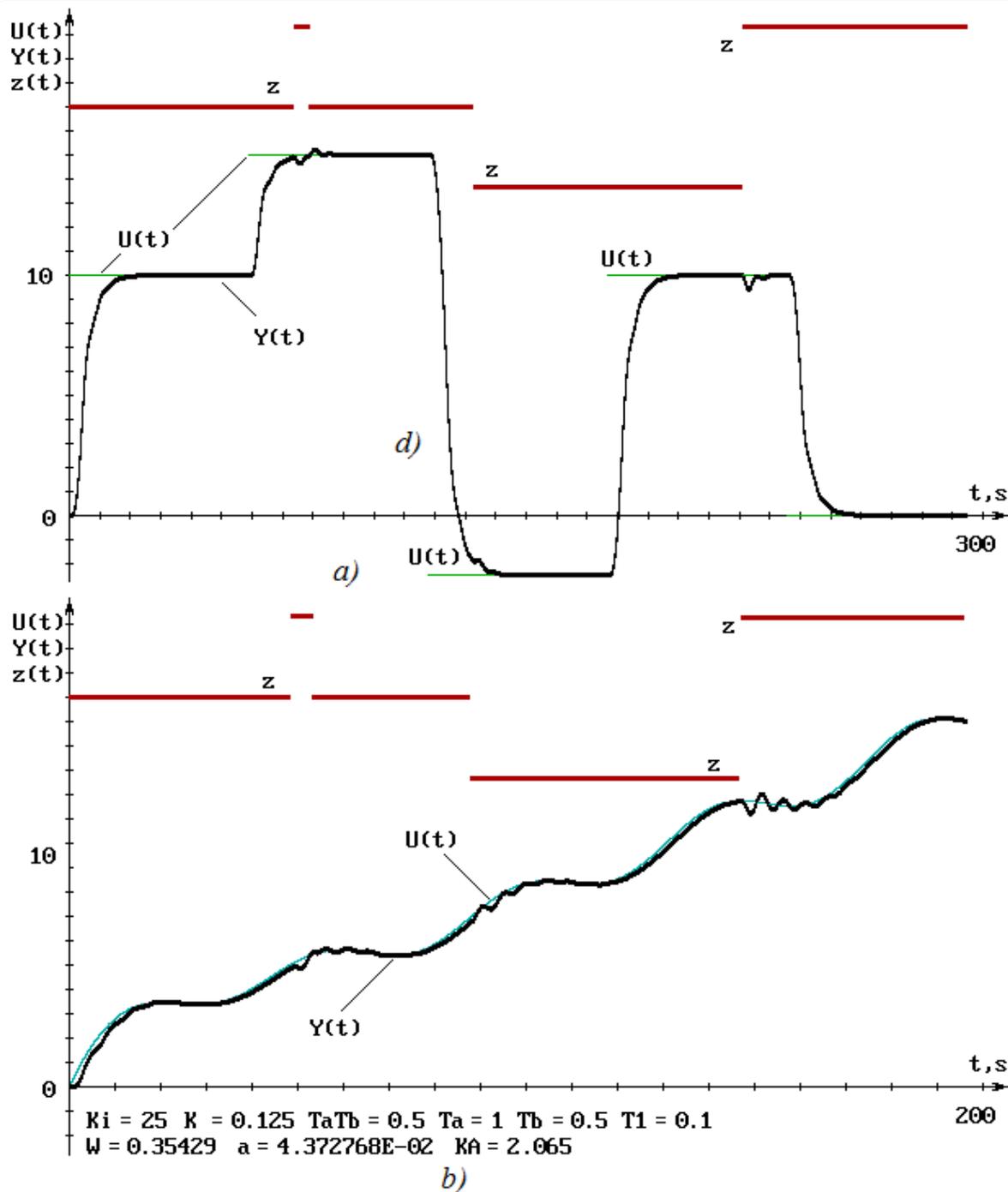


Рис. 8. Переходные характеристики системы 5-го порядка инерционности с 2-м порядком астатизма при внешних воздействиях $z(t)$ и произвольно изменяющейся функцией управления $U(t)$: а) – ступенчато; б) – плавно.

Выводы и предложения.

Оптимальное управление предложенным способом обеспечивается:

1. Применением рациональных спектральных характеристик управляющего сигнала. Известно, что любая детерминированная функция управления системой может быть представлена с помощью преобразования Фурье спектром элементарных периодических функций. Управляемая система характеризуется своими частотными параметрами, и другие частоты являются помехами, которые вызывают в системе реактивные процессы,

ухудшая качество управления. Выделение из управляющей функции естественных для системы частотных спектров и подавление остальных предотвращают условия реактивных процессов в системе, улучшает качество управления системой. Таким образом, алгоритм способа обеспечивает помехоустойчивость системы.

2. Выбором исходных параметров системы для синтеза оптимального управления. В процессе движения системы изменяются ее динамические параметры и это необходимо учитывать. Для упрощения расчетов при разработке алгоритмов

управления сложными системами используются различные методы аппроксимации. В частности, системы с астатизмом выше нулевого порядка имеют полюсы передаточной функции, которые обеспечивают колебательные свойства в переходных режимах. При этом существенные значения

амплитуды и степени демпфирования имеют колебания основной (низкой) частоты. Поэтому исходное уравнение системы может быть аппроксимировано, например, уравнением колебательной системы второго порядка, переходной процесс которой описывается соответствием функции времени операторным методом:

$$y_{appr}(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \cdot \exp(-\alpha t) + y_0 \rightarrow \frac{\omega \cdot A \cdot \cos \varphi}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} + \frac{(s + \alpha) \cdot A \cdot \sin \varphi}{(s + \alpha)^2 + \omega^2}$$

На основе частотных параметров системы, определенных датчиками, примем соответствие, например, передаточной функции системы n -ного порядка (при $n \geq m$) с 2-м порядком астатизма:

$$W_{as}(s) = \frac{y(s)}{U_c(s)} = \frac{1}{s^2} \frac{e_m s^m + e_{m-1} s^{m-1} + \dots + e_1 s + e_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_2 s + a_1} \approx \frac{\omega \cdot A \cdot \cos \varphi}{(s + \alpha)^2 + \omega^2} + \frac{(s + \alpha) \cdot A \cdot \sin \varphi}{(s + \alpha)^2 + \omega^2}$$

Правая часть выражения дает возможность использовать упрощенное математическое описание сложной системы для разработки способа оптимального управления этой системой. В частности, второй порядок системы дает возможность определять оптимальные управления не только по основной координате выходной переменной, но и по двум ее ближайшим производным. Переход от динамических коэффициентов к частотным параметрам адекватно моделирует динамику сложной системы и позволяет осуществить оптимальное по динамичности управление и стабилизацию, например, высокоманевренных летательных аппаратов и высокоточных систем позиционирования.

3.Рациональным алгоритмом последовательности действий. Быстродействие и энергетическая эффективность, а именно минимизация времени и траектории переходных режимов обеспечивается действиями управляющих воздействий динамических координат поочередно во времени, начиная с высшей производной до самой функции управления. Все координаты ограничены и согласованы с динамическими свойствами системы: привода, трансмиссии, объекта управления. Очередное изменение каждой координаты соответствует достижению своего ограничения предыдущей координатой. Это поддерживает постоянство знака первой производной, и обеспечивает монотонное изменение (без колебаний) основной координаты, при достижении которой заданного значения все производные становятся равными нулю. Так, при ступенчатом управляющем воздействии переход основной координаты в новое состояние происходит по траекториям вогнутой и выпуклой парабол сопряженным между собой алгоритмом способа. Способом обеспечивается ограничение воздействий по основной координате движения, а также по контролируемым производным.

4.Запасом устойчивости (демпфированием). В структуре регулятора астатических систем присутствуют интегрирующие устройства, которые вносят фиксированные фазовые сдвиги по $-\pi/2$ в ам-

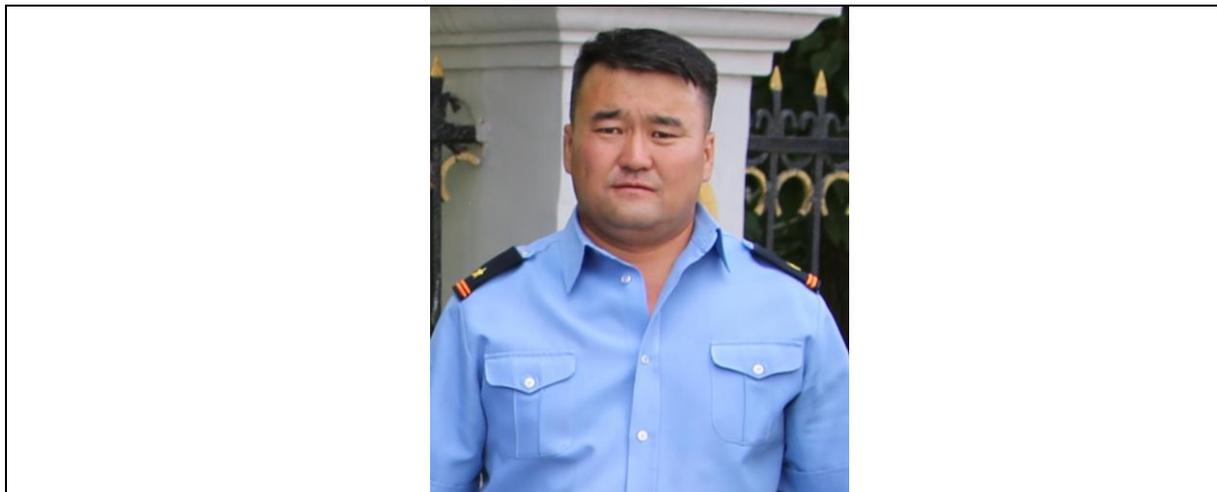
плитудо-фазочастотную характеристику разомкнутой системы и, соответственно, передаточная функция замкнутой системы имеет полюсы. Для создания необходимого запаса устойчивости системы по управлению и возмущению обеспечивается рациональное перераспределение полюсов и нулей передаточной функции введением в структуру управляющего сигнала фазовых сдвигов, компенсирующих действие интегрирующих устройств. Способом это обеспечивается при помощи многокоординатного воздействия на динамические (фазовые) координаты: на основную координату движения и на приведенные к ней координаты ее n производных. Наличие в воздействии составляющих производных от управляющей функции, определенных с учетом частотных свойств системы и динамических свойств привода обеспечивает фиксированные фазовые сдвиги до $+\pi/2$, что компенсирует инерционные свойства системы созданием необходимого запаса по фазе. Такое демпфирование не вносит изменений в амплитудо-частотную характеристику системы, поскольку модуль частотной передаточной функции $|W(j\omega)|=1$, не ухудшает быстродействие и полосу пропускания системы. Это обеспечивает компенсацию фазовых сдвигов, естественных для астатических систем, без изменения ее свойств.

Способ многокоординатного воздействия обеспечивает синтез оптимальных управлений сложными динамическими системами при любой управляющей функции, что обеспечивает необходимую статическую и динамическую точность управления. В том числе для гиперзвуковых, высокоманевренных систем позиционирования.

Список литературы:

1. Чермалых В.М. Исследование сложных электромеханических систем. – Киев, КПИ, 1979. – 63 с.
2. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования // В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев / – М.: Машиностроение, 1985. – С155.

3. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования. В.А.Бесекерский, Е.П.Попов // М., Наука, Гл. ред. ф.-м. литер. / 1975. –768 с.
4. Dorf, Richard C. Modern control systems / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. // – 12th ed. – 2011. – 1082 p.
5. Патент України на винахід UA114179. МПК (B66B1/32) Спосіб гальмування шахтної підіймальної установки (Method of braking the mining hoist). /В.І. Васильєв, Є.В. Васильєв; Заявл. № а201314784, 17.12.13., опубл. 10.05.2017, бюл. № 9.
6. Патент України на винахід UA117229. МПК (G05B13/00) Спосіб оптимального керування астатичними системами (Method for optimal control of astatic systems). /В.І. Васильєв, Є.В. Васильєв; Заявл. № а201503914, 24.04.15., опубл. 10.07.2018, бюл. № 13.
7. Васильев В.И. Пути снижения динамических нагрузок в канатах шахтных подъемных установок системами автоматически регулируемого предохранительного торможения / В.И. Васильев // Стальные канаты: Сб. науч. тр. МАИСК. – Одесса: “Астропринт”, 2010, №8. – С. 18-29.
8. Васильев В.И. Оптимизация управления сложной электромеханической системой с распределенными параметрами [Текст] // Адаптивні системи автоматичного управління. Міжвідомчий науково-технічний збірник – 2013. – 1(22). – С. 95-101 – Режим доступу: <http://asac.kpi.ua/article/view/29085>.
9. Подчукаев В.А. Квантово-волновой дуализм описания динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 7. С. 453-457. DOI 10.17587/mau.17453-457. Режим доступа: <https://mech.novtex.ru/jour/article/view/326/187><https://mech.novtex.ru/jour/article/view/326/187>.
10. Васильев В.И. Формирование рациональных воздействий для управления предохранительным торможением шахтных подъемных установок / В.И. Васильев // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 68. – С. 96-100.
11. Кузовков Н.Г. Системы стабилизации летательных аппаратов. М.: Высш. шк., 1976. 304 с.



Erdenebat Gantumur

Senior state inspector of protection from the scourge of the Department for emergency situations in the Tuv aimag of Mongolia

HAZARDS CONSTRUCTION OF NEW RAILWAYS IN MONGOLIA AND SOME PROTECTION PROPOSALS

Annotation. The government of Mongolia has adopted a large program to increase the railway network. New railway sections will be located in dangerous places. A greater threat are dangerous natural factors. Relief and climate can contribute to accidents and disasters. A new disaster protection system needs to be planned. Technical equipment should have the necessary number of recovery and fire trains. It is necessary to justify scientifically the place of dislocation of recovery and fire trains.

Keyword. *Mongolia, railway, construction, natural disasters, emergencies, disasters, danger, protection, recovery trains, fire trains, locations.*

Introduction. The Mongolian Government has approved plans for the new construction of Railways till 2030 [1; 14]. By 2020, two new railway lines should be built [3; 4] in the North and East of Mongolia (see figure):

1) the Erdenet-Ovoot, with subsequent continuation at the site Ovoot-Artsour;

2) the Choibalsan – Saynshand, with the continuation of the plot Zuunbayan-Tavan Tolgoi.

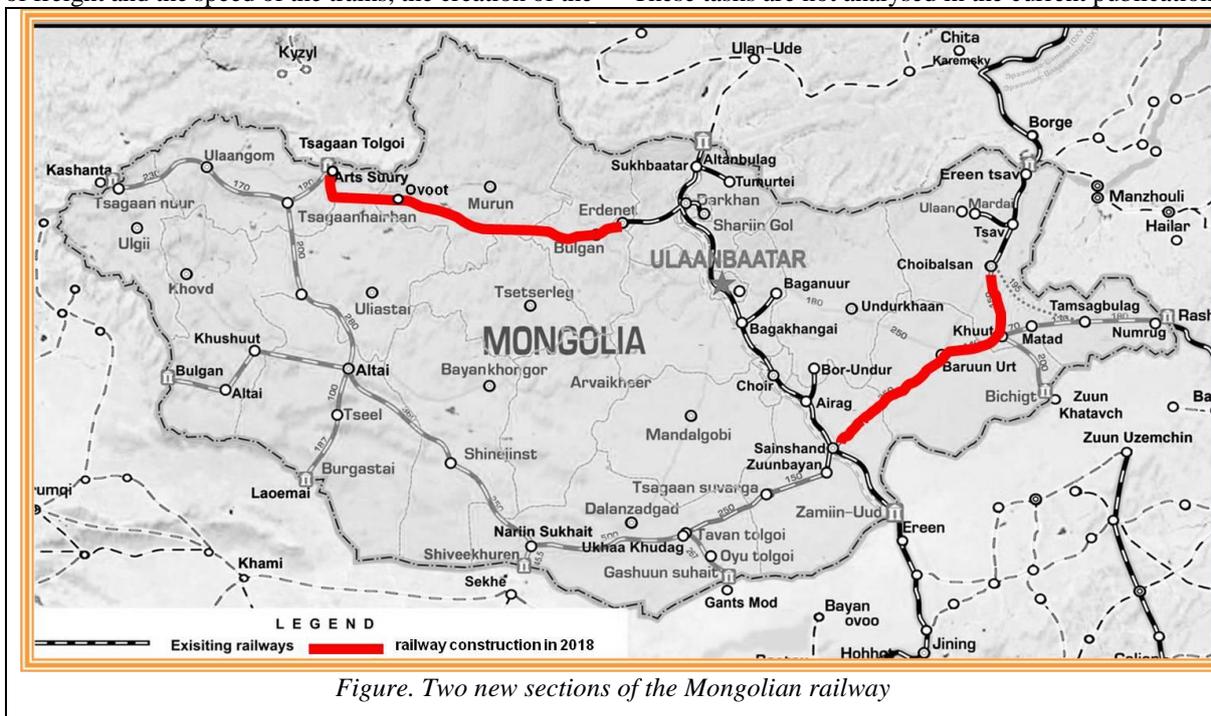
Railway transport has always been an object of great danger. The construction of new Railways should

take this into account. The problem is the creation of a system of protection against man-made accidents and catastrophes, ensuring safety in natural disasters.

Analysis of recent researches and publications.

In the media and scientific publications discusses the economic and technical challenges: increasing volume of freight and the speed of the trains, the creation of the

railway and infrastructure upgrade of locomotives and wagons, plans for electrification [2; 13]. But the construction of new railway sections should provide for science-based planning of the development in this place of the fire safety and emergency protection system, referred to in Mongolia as the disaster protection system. These tasks are not analysed in the current publication.



The purpose of the article is to study natural and man-made emergencies, which are necessary for the scientific justification of railway construction.

Results and discussions. The analysis revealed the following main geographical and climatic characteristics and hazards in the developed area.

Initial. Geographical and climatic characteristics of the territory [3; 14]:

1) the Erdenet-Ovoot and Boot-Artsour in Bulgan aimags Khövsgöl, Uvs and Zavkhan:

the relief has a gradual transition (from East to West) from the low mountains to the high Khangai mountains, which have the highest point of more than four thousand meters.;

the Khangai mountains are covered with larch taiga and mountain tundra with permafrost;

in the Khangai mountains, the line of the new railway will be crossed by rivers: Selenga, Delger-Muren, Orkhon, Hanui-Gol, Chulutyn-Gol, etc. Selenga-the largest river, has a depth of at least 2 m, freezes for six months, has an ice thickness of up to 1.5 m, two annual floods - spring (snow) and summer (rain);

in the area of the new railroad many permanent and temporary lakes in the Great lakes basin - Ubsu-Nur, Khara-Us-Nur, Hirgis-Nur, and the Hobsugol lake has a depth of 238 m;

2) the Choibalsan – Saynshand and Zuunbayan-Tavan Tolgoi in the aimags of Dornod, Sukhbaatar, Omnogovi and Dornogovi:

from the center of Mongolia, the height of the mountains gradually decreases and they turn into a desert plateau height of 1000-1200 meters above sea level (in the East) or hilly steppe (in the South), turning into a semi-desert;

the climate is arid of cold deserts, with hot summers and very cold winters, constant droughts and sand storms;

during the year, more than half of cloudless clear days (about 250); in the area of the volcanic plateau of Dariganga there are up to 220 extinct volcanoes, the highest of Shiliin-Bogd-Uul (1778 m);

the territory has a desert and dry, grassy steppes, gently sloping ridges (altitude up to 200 metres), with elongated surface of hills and low mountains (at a height of from 50 to 100 metres) with scattered holmium and groups of hills of various shapes;

few water sources in the upland areas are typical of small lakes with salt water;

heavy flooding began to occur due to heavy rains, especially in 1966, 1982, 2003 and 2009, there were deaths and extensive material damage;

in most of the territory there is no continuous woody vegetation.

Second. The areas of new sections of the Erdenet-Ovoot and Ovoot-Artsuur railway in Northern Mongolia, due to the sharply continental climate, large areas of coniferous forests in the mountains and anthropogenic load, are characterized by a high fire hazard of the forest. In the forests of this territory annually there

are up to one and a half thousand forest fires and fire season is divided into two periods:

- a) spring fire season (March-June);
- b) autumn fire-dangerous period (August-November).

Basically, there are ground fires (96%).

Areas of new railway sections Choibalsan – Saynshand and Zuunbayan-Tavan Tolgoi in South-East Mongolia have a greater risk of fires. For half of 2014 in this area recorded 2 640 fires at sites, 28 cases of earthquakes with a magnitude of more than 3.5 points and 132 forest-steppe fire.

Every year in Mongolia there are up to 300 large natural forest and steppe fires with signs of a large natural disaster.

Third. In the area of the new railway network may occur natural disasters due to the dangers of the railway process [1; 4; 14]:

- 1) from danger of fires on railway transport, first of all – on a rolling stock:

due to careless handling of fire, sparks of the locomotives and the furnaces of the wagons of the supply trucks, boilers for heating of passenger cars, as well as technical faults;

due to violation of loading rules (causing spontaneous combustion, friction of the packing wire, etc.);

due to the ingress of unidentified ignition sources into wagons and containers or on open rolling stock;

because of malfunction of electric equipment, oversight of devices of heating and their malfunction, accidents and crashes, sparks of electric welding and other reasons;

- 2) from the danger of influence of toxic substances-gases, vapors and dust released during technological processes:

works painting, polymer processing, charging of batteries, electroplating, welding and other;

air pollution by vapors of oil aerosol, benzene, toluene, xylene in engine rooms of locomotives, in stall parts of depot, offices of repair of the fuel equipment and in other rooms;

air pollution in forge and forge and spring offices carbon monoxide and sulfur dioxide, oxides of nitrogen, aerosol of metals, and in mechanical offices-carbon monoxide, aerosol of oxides of iron and lubricating coolant and others;

- 3) from the danger of the influence of thermal radiation on the hot production of the enterprises of a railway transportation of Mongolia – casting and forging parts, bebitanalgon, impregnating, heat and welding departments, and to individual welding stations and sections of diesel locomotives;

- 4) from failures of electric equipment of locomotives in the route when the probability of erroneous actions of locomotive crews increases;

- 5) from hazardous situations during depot repair of locomotives and wagons, when the work is done on machine tools, using jacks, mechanized devices, power tools, etc.

Fourth. Man-made causes of possible natural disasters:

- 1) accidents at industrial objects in the territory: meat-packing plant «Selenge Makh Market», «Spirt Bal Buram», «Altan, Tarea» (flour production), «Khutul» (cement), «Bold tomor. Iroo gol» (iron ore) processing plants and timber and mining of gold and other objects;

- 2) aviation accidents in the implementation of domestic flights to the airport of Bulgan.

Fifth. An additional problem is that the road network of Mongolia in the area of the new railway is unpaved and underdeveloped, there are many hard-to-reach mountain areas and, basically, does not coincide with the line of the planned railway track [4].

Technical equipment of fire protection in the North of Mongolia for fire control includes the following technical means:

in Sukhebaator -10 fire engines, 4 rescue vehicle and rescue boat 4;

in the city of Mandal - 8 fire fighting vehicles;

in Hutul -5 fire engines;

in sumon Bayangol - 4 fire trucks;

in the fire Department of the metallurgical plant «Erdenet» - 6 fire engines.

Sixth. The analyzed statistics of accidents on the existing railway network of Mongolia showed the following facts.

October 13, 2001, due to an accident on the Ulaanbaatar railway connecting Russia with China. The movement of all trains was suspended. At 175 km of the road, on the Erhat - Baroun-Haraa stretch, one of the tanks of the train with 58 tanks of crude oil derailed because of the breakdown of the axle of the wheel pair. Arrived at the place of more than 300 road workers on a hard-to-reach single-track section of the road, where on one side of the railroad tracks overhanging mountains, on the other river flows, liquidated the consequences of the accident. After 12 hours, all trains were restored. The President of Mongolia Natsagiin Bagabandi, who was traveling on a liter train on this line from Ulaanbaatar to Erdenet, to continue the trip, was forced to transfer to a car.

On the night of 23-24 July 2016, Russian freight cars carrying timber from Russia to China derailed near the Mongolian city of Darkhan. The accident occurred on the road № 14 near the depot «Darkhan-2», without casualties. As a result, about 40 meters of the road were destroyed, the damage was estimated at 7.8 million tugriks. The cause of the accident was the softening of the soil due to heavy rain. One of the cars derailed, followed by three more.

At night, from 11 to 12 August 2018, on 747 km of the Trans-Mongolian highway, a passenger train № 286 «Ulan Bator – Sainshand» crashed [6; 9; 15]. The main cause of the emergency are heavy rains in southern Mongolia, washed away the roadbed of the railway track. The locomotive and cars derailed, some of them turned over and fell into the accumulated accumulations of water [9]. Of the 328 passengers for more than a hundred people needed first aid in the hospital Choir (the administrative center of the aimag Govi-Sumber the Sumber and soums) and hospitalization part of the passengers in the neighboring hospital Airag soums

[15]. About 500 people and 100 pieces of equipment from the operational groups from the state emergency Agency of Mongolia arrived in the crash area quickly, under the leadership of the Director of the Department of operational management Colonel B. Mandahgarel, medical services, fire protection, the armed forces of Mongolia and the police [6]. The large scale of man-made emergencies required a large amount of emergency recovery work. After the management of the Ulaanbaatar railway appealed to the Russian railwaymen. From the capital of the Republic of Buryatia, Ulan-Ude, the recovery train «VP-7» departed to the crash site. His arrival was expected by 22.00 on the day of the emergency, but he arrived four hours later – by 2 am on August 13, 2018. the duration of the arrival time is due to the fact that the recovery train from Ulan-Ude station to the Russian border station Naushki had to overcome the distance of 252 km, and then – almost 800 km in Mongolia to the place of work.

Seventh. The analysis of the first two new sections of the Mongolian Railways is an example for the analysis of other new sections to be built [2; 3]:

1) un to 2025:

Hout-Mated-Tamsagbulag-Numrug (380 km), through the aimag of Dornod to the Chinese station Rashaan;

Hout-Bichigt (200 km), through the aimags of Dornod and sühbaatar to the Chinese border station Soon, Hataw;

Tavantolgoi - Geshuusheit (267 km) to the Chinese border station Handmad;

Nariinshoohayt -Seviyorum (153 km) to the Chinese border station Shehe;

2) up to 2030.:

Nariinshoohayt - Shinejinst – Altai – Tsagaanbaatar (1210 km) through aimags Bayanhongor, Govi-Altai and UVS to the planned construction of the Russian border railway station Caran Tolgoi;

Tsagaanbaatar - Ulaangom –Tsagaannuur (400 km), through the aimags of Uvs and Bayan ölgii;

Altai – Housout – Bulgan (about 400 km) to the border crossing in the Chinese point of Taikiken;

Altai – Zeel – Burgastai (287 km) to the border crossing in the Chinese point of Lahemaa.

The planned increase in rail transport in Mongolia will be achieved by:

1) increasing the weight of freight trains;

2) increasing the capacity of railway lines.

This should be achieved by:

construction of solid second tracks on single-track lines; electrification of railway lines.

The first object in carrying out these activities is the main transit route Naushki-Hoyt-Ulan Bator-Zamyn-Uud. In the future, the industrial development of new territories will be carried out consistently:

the construction of railway sections on diesel traction, as less expensive;

the construction of new railway sidings stacked priemootpravochnye paths of increased length;

the construction of the second ways in the industrial development of new areas;

electrification of the most actively exploited sections of the railway.

The maximum program provides for the possibility of organizing high-speed passenger and freight rail traffic.

Conclusions and suggestions.

1. There is a great threat to the operation of the new railway from natural disasters, so:

the composition of measures to protect against internal threats of accidents and emergencies in new railway sections should be determined in advance, in accordance with regulatory legal and technical documents, including scientifically-based adjustment in respect of unresolved issues;

it is necessary to reveal the most fire-dangerous sites of a railway track out of stations and to carry out planning of special entrances (drives) to them motor vehicles.

2. The development of a new railway network in Mongolia will be inseparably accompanied by a simultaneous increase in the risk of accidents and catastrophes:

trains during movement (descents of the rolling stock from rails, collisions of trains, arrivals on obstacles on crossings or out of them, fires, explosions, etc.) and accidents on production objects of the railroads (stations, depot, workshops, plants, etc.);

due to the occurrence of a malfunction of paths for geographical and climatic reasons (earthquakes, landslides, talus, landslides, mudflows, floods, ice drifts, congestion, snow drifts and avalanches, ice, fog, etc.);

due to the poor technical condition of the rolling stock (malfunctions, wear and tear, violation of the requirements for operation and repair);

because of the heavy load of Railways, including exceeding regulatory requirements;

due to errors in the work of dispatchers, drivers and other specialists (lack of professionalism, lack of technical equipment of workplaces, negligence, fatigue, inattention, etc.);

due to faulty alarm means, centralization, blocking, power supply;

due to violation of the rules of transportation of dangerous goods (toxic and explosive substances, sources of ionizing radiation, etc.) that makes possible explosions and fires of tanks and wagons;

due to non-compliance of passengers with the rules of safe behavior, etc.

3. It is necessary to plan the effective use of fire and air trains:

places of their dislocation (to ensure the minimum arrival on the sections of several directions of roads) - near the junction stations and on the tracks, allowing to decrease without maneuvers in any direction;

each recovery train should be ready for cleaning of oversized rolling stock and cargo, track repair, restoration of the contact network, communication facilities, performing crane works up to 80 tons, have Autonomous diesel-electric generators, hydraulic track jacks, illuminating the diameter of not less than 50 meters

portable lighting towers, bulldozers, should be ready to move and operate in tunnels, etc.;

to the crash sites usually arrive two or three recovery trains-from different sides of the site on which the incident occurred;

in addition to recovery and fire trains on the Railways to restore normal traffic and eliminate the consequences of collisions and derailment of rolling stock can be used special railcars, railcars and cars to restore the path and power supply devices, cars and cars repair and restoration of communication, emergency field teams;

be prepared, at the request of the heads of administrations of aimags and somons, to participate in emergency situations, for example, to eliminate the consequences of snow drifts or landslides in mountainous areas;

it is forbidden to occupy Parking of fire and recovery trains with other structures;

recovery and fire trains are extraordinary trains, not provided for in the regulatory schedule.

4. Based on the General analysis, the author developed specific proposals to justify the required number of fire and recovery trains for the entire railway network of Mongolia in the new form, namely:

1) places of placement of recovery trains, total number of 8 units, to define already functioning and planned to construction railway stations [2; 14]:

in the first stage – Hout, Sainshand, Salhit;

at the second stage – Tavantolgoi, Bagakhangai;

in the third stage – Nariin Suhait, Altayev, Nagahara;

2) places of the constant Parking of fire trains, total number of 13 units, to define railway stations:

at the first stage – Hout, Saynshand, Salhit, Erdenet, Ulaanbaatar;

at the second stage – Tavantolgoi, Bagakhangai, Choibalsan;

in the third stage – Nariin Suhait, Altayev, Nagahara, Boot, Artsour.

The creation of a group of fire and recovery trains should be carried out in stages, that is, simultaneously, without lag, with the stages of construction of new railway lines. In addition it is necessary to consider:

construction of the route anchorage firefighters and emergency trains [4];

the state of the organization of fire and rescue services in garrisons of passing of the railroads as it is investigated by Brushlinsky N. N., Sokolov S. V. and Grigorieva M. P. [5];

organizational support of works on liquidation of large-scale disasters analyzed Sednev V. A. [10] and Fedotov S. B. [12];

actions of fire and recovery trains in the conditions of accidents during transportation of emergency chemically dangerous substances by rail, considered by Silnikov M. V. [11];

suggestions on definition of a rational list and the number of samples of military and special equipment, equipment and property, considered by Mazanik A.I. and Sulima G. T. [7];

ensuring anti-terrorist protection of objects of railway transport, investigated Pystov N. N. and Chepunoy A. Y. [8].

References

1. Гансүх А. Зам, тээврийн салбар эрчимтэй хөгжлийн үедээ ирээд байна // Site «УЛААНБААТАР ТӨМӨР ЗАМ» ХНН («ULAANBAATAR RAILWAY» JSC). - URL: <https://ubtz.mn/details/464#>. - (Date of access – 24.08.2018).

2. Давааням Д. Шинэ торгоны зам ба Монгол // Site «Икон сайтад сэтгэгдэл оруулахад анхаарах зүйлс». - URL: <https://ikon.mn/n/4mh>. - (Date of access – 24.08.2018).

3. Монгол-Оросын харилцаа, хамтын ажиллагаа шинэ шатанд гарсныг албан уулзалтууд нотлов // Site «Мэдээллийн МОНЦАМЭ агентлаг». - URL: <http://www.montsame.mn/read/56517>. - (Date of access – 24.08.2018).

4. Шинэ төмөр зам төсөл // Site «Монголын төмөр зам». - URL: <http://www.mtz.mn/content/17>. - (Date of access – 24.08.2018).

5. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П. Организация пожарно-спасательных служб в городах мира // Журнал «Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация». – Москва: Изд-во АГПС МЧС России. – 2017. - № 1. – С. 49-55.

6. Крушение поезда в Монголии // Сайт Монголия сейчас. - URL: <https://www.mongolnow.com/krushenie-poezda-v-mongolii/>. - (Дата обращения - 13.08.2018).

7. Мазаник А.И., Сулима Т.Г. Методика определения рационального перечня и количества образцов военной и специальной техники, оборудования, имущества, снаряжения и экипировки для оснащения спасательного воинского формирования МЧС России // Научный журнал «Научные и образовательные проблемы гражданской защиты». - Химки: Изд-во АГЗ МЧС России. – 2017. - № 1 (32). – С. 3-6.

8. Пестов Н.Н., Чепурной А.Ю. Роль и место органов внутренних дел на транспорте в обеспечении антитеррористической защищенности объектов железнодорожного транспорта России // Труды Академии управления МВД России, 2010, № 2. С. 33-37.

9. Поезд Улан-Батор — Сайншанд сошел с рельсов // Форум Монгол Су. - URL: <http://mongol.su/поезд-улан-батор-сайншанд-авария/> (Дата обращения - 13.08.2018).

10. Седнев В. А. Методика обоснования и оценки эффективности комплекса средств механизации работ по развёртыванию аварийно-спасательных формирований // Интернет-журнал Академии ГПС МЧС России «Технологии техносферной безопасности». Выпуск № 1 (65), 2016 г. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>. (Дата обращения - 18.08.2018).

11. Сильников М.В. Проблемы организации обеспечения безопасности при перевозке аварийно химически опасных веществ железнодорожным

транспортом // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. - 2016. - № 3. - С. 28-32.

12. Федотов С.Б. Научная проблема востребованности специальных пожарно-спасательных машин, приспособленных к работе в высокогорных условиях // Материалы XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. В 2-х частях. – Балашиха: Изд-во ВНИИПО МЧС России, 2017. - С. 536-538.

13. Polkowski Artur. Wszystko o Kolei Transsyberyjskiej z Rosji do Mongolii // Witryna «No More Map». - URL:

<http://nomoremaps.com/1115/kolej-transsyberyjska-z-rosji-do-mongolii/>. – (Data odwołania – 24.08.2018).

14. The new Rail Policy in Mongolia. Press Release of Aspire Mining Limited // Site «Wegh Group. Italian Excellence for Railway Industry». - URL: <https://www.weghgroup.com/ru/ru-the-new-rail-policy-in-mongolia/>. - (Date of access – 24.08.2018).

15. Eight injured after train with 328 passengers derails in Mongolia // Site CGTN. - URL: https://news.cgtn.com/news/3d3d514f304d444e79457a6333566d54/share_p.html. - (Date of access – 24.08.2018).

Dragomirov S. G.

*doctor of engineering, professor,
Vladimir State University, Russia*

Dragomirov M.S.

candidate of technical Sciences

L.L.C. "STC "AutoSphere" at Vladimir State University", Russia

Eydel P.Ig.

engineer,

L.L.C. "STC "AutoSphere" at Vladimir State University", Russia

Gamayunov A.Y.

Engineer,

LLC "STC "AutoSphere" at Vladimir State University", Russia

THE NATURE AND CHARACTERISTICS OF THE IMPURITIES IN COOLING SYSTEMS OF VEHICLE ENGINES

Драгомиров Сергей Григорьевич

*доктор технических наук, профессор кафедры двигателей
Владимирского государственного университета
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Россия*

Драгомиров Михаил Сергеевич

кандидат технических наук,

ООО «НТЦ «АвтоСфера» при ВлГУ», Россия

Эйдель Павел Игоревич

инженер

ООО «НТЦ «АвтоСфера» при ВлГУ», Россия

Гамаюнов Антон Юрьевич

инженер

ООО «НТЦ «АвтоСфера» при ВлГУ», Россия

ПРИРОДА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Summary. The article discusses the sources and nature of contamination of coolant and engine cooling systems in General. 3 essentially possible ways of formation/receipt of impurity in the cooling system are analyzed. The estimation of each of these ways is given. The nature of contamination and the mechanism of formation of individual contaminants in the cavity of the cooling system are described. The data on the chemical and fractional composition of contaminants are presented. The conclusion is made about the dangerous influence of impurity on the operation of engines.

Аннотация. В статье рассматриваются источники и характеристики загрязнения охлаждающей жидкости и систем охлаждения двигателей в целом. Проанализированы 3 принципиально возможных пути образования/поступления загрязнений в систему охлаждения. Дана оценка каждого из этих путей. Описана природа загрязнений и механизм образования отдельных загрязнений в полости системы охлаждения. Приведены данные по химическому и фракционному составу загрязнений. Сделан вывод об опасном влиянии загрязнений на работу двигателей.

Keywords: motor autotransport engines, coolant, impurity, nature of impurity, chemical composition, fractional composition.

Ключевые слова: автотранспортные двигатели, охлаждающая жидкость, загрязнения, природа загрязнений, химический состав, фракционный состав.

Постановка проблемы

Критически острой проблемой в области систем жидкостного охлаждения автотранспортных поршневых двигателей является загрязнение охлаждающей жидкости (ОЖ) и всей системы в целом. Эта проблема существует с момента появления систем жидкостного охлаждения (СЖО). К сожалению, она до сих пор радикально не решена в современной науке и практике автоиндустрии, т.к. применяемые до настоящего времени технологии и устройства очистки ОЖ в процессе эксплуатации двигателей не соответствуют современным требованиям.

Между тем, непрерывно возрастающая структурная и конструктивная сложность современных СЖО [1,2] при одновременном повышении требований к их надежности и теплоотводящей функции в процессе непрерывного форсирования двигателей, обуславливают повышенные требования к чистоте ОЖ и системы охлаждения.

Анализ данных эксплуатации автотранспортной техники показывает, что от 25 до 40 % неисправностей и отказов двигателей приходится на СЖО [3,4]. Чаще всего неполадки в системе охлаждения появляются уже после 150...200 тыс. км пробега автомобиля. У тракторных двигателей и двигателей тяжелых грузовиков (а также автобусов), работающих обычно с 70...85% нагрузкой, из-за более тяжелых условий работы неполадки могут возникнуть уже после 500...700 часов эксплуатации.

К основным неисправностям СЖО относятся различные течи, разрушение прокладок и сальников, ошибки в срабатывании термостатов и датчиков, закупоривание проточных каналов радиаторов, блоков и головок цилиндров. В условиях эксплуатации в системе охлаждения и ее элементах протекают процессы кавитационной эрозии и химической коррозии, появляются отложения на теплопередающих поверхностях (накипь), образуются продукты разложения и выработки антифризов. Все это приводит к ухудшению передачи тепла от нагретых деталей двигателя в системе охлаждения, что может вызвать его перегрев и снижение энергетических показателей, а также значительно повышает риск выхода двигателя из строя.

Все указанные проблемы СЖО при эксплуатации автомобильных и тракторных двигателей в значительной степени обусловлены наличием в ОЖ загрязнений различной природы.

Анализ последних исследований и публикаций

Зарубежные исследования [3,5,6] (в России такие исследования не проводились) состава загрязнений антифриза выявили, что в них входят:

- продукты химической коррозии и кавитационной эрозии металлов;
- масляные и жировые отложения;

- частицы песка, грязи, силиконовых герметиков;
- продукты разложения антифриза (гели) и отработанных присадок;
- частицы накипи;
- фрагменты разрушившихся уплотнительных элементов.

Применение абсолютно чистой охлаждающей жидкости в СЖО транспортных двигателей **практически невозможно**, потому, что всегда будут существовать производственно-технологические и эксплуатационные условия, способствующие образованию загрязнений. Принципиально возможны только три пути появления загрязнений в ОЖ, в соответствии с которыми сами источники загрязнений можно классифицировать на [7]:

1. производственно-технологические (образуются в процессе производства двигателей);
2. внешние эксплуатационные, вносимые в СЖО извне в процессе работы;
3. внутренние эксплуатационные, образующиеся в СЖО в процессе работы.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

На сегодняшний день найдено эффективное, простое и надежное решение проблемы очистки ОЖ [8], однако открытым остается вопрос о природе и характере загрязнений, образующихся в СЖО автотранспортных поршневых двигателей.

Выявление характера загрязнений и определение природы их происхождения являются важной информацией для создания эффективной технологии предотвращения загрязнений или очистки ОЖ в процессе эксплуатации двигателей.

Нами опытным путем установлено, что **первый источник** вносит пренебрежимо малую долю загрязнений, т.к. в процессе производства двигателей предпринимается целый ряд специальных технологических мер, направленных на очистку деталей и узлов двигателей от загрязнений (металлических опилок и стружки, окалины, грязи, формовочного песка и т.п.). Для этого используется виброочистка блоков цилиндров и головок, мойка деталей с применением поверхностно-активных веществ, продувка каналов и полостей сжатым воздухом и др.). В связи с этим этот источник загрязнений СЖО можно обоснованно считать малозначимым.

Второй источник – внешние эксплуатационные загрязнения, попадающие в СЖО в процессе работы – полностью зависит от культуры эксплуатации автомобильной техники. При должной культуре внешние загрязнения, попадающие в СЖО при эксплуатации, также можно свести к минимуму.

Таким образом, наибольший интерес для анализа представляет **третий источник** загрязнения системы – образование (генерация) различных загрязнений внутри самой СЖО в процессе эксплуатации двигателя.

Цель статьи

Целью статьи является изложение результатов исследований по определению природы и химического состава загрязнений охлаждающей жидкости автотранспортных двигателей, образующихся в процессе эксплуатации в полости системы охлаждения.

Изложение основного материала

Наши исследования показывают, что внутри самой СЖО образуются загрязнения различной природы и характера, источниками которых являются следующие процессы.

Химическая коррозия металлических (как черных, так и цветных металлов) элементов СЖО является одним из наиболее существенных источников загрязнений системы [9-11].

Химическая коррозия – это процесс взаимодействия металла с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окисли-

тельного компонента среды протекают одновременно в одном акте. Продукты взаимодействия пространственно не разделены.

Электрохимическая коррозия – это процесс взаимодействия металла с коррозионной средой (раствором электролита), при которой ионизация атомов металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекают не в одном акте и их скорости зависят от электродного потенциала.

По характеру изменения поверхности металла или сплава различают несколько видов коррозионных разрушений [10-12]: сплошная равномерная или неравномерная, структурно-избирательная, пятнами, язвами, точками (питтинговая), подповерхностная, межкристаллическая.

Практически большинство из этих видов коррозии обнаружено нами при исследовании СЖО в эксплуатационных условиях (рис.1).



Рис. 1. Коррозионные отложения на элементах СЖО

Кавитационная эрозия – известный процесс разрушения металла, обусловленный ударным воздействием внешней жидкой среды [13]. В СЖО двигателей кавитация протекает в ходе образования и «схлопывания» пузырьков пара в жидкости, находящейся в состоянии, близком к кипению. В момент «схлопывания», давление и температура газа достигают значительных величин (по некоторым данным до 100 МПа и 1000 °С). После «схлопывания» полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве и сопровождающаяся отрывом частичек металла от поверхности детали.

Кавитационной эрозии могут подвергаться как черные металлы (сталь, чугун), так и алюминиевые сплавы [12]. Пластиковые элементы СЖО более стойки к кавитационной эрозии.

Причинами, обуславливающими кавитационную эрозию в СЖО, может быть перегрев ОЖ, образование зон разрежения в потоках, вибрация отдельных элементов (например, так называемой «мокрой» гильзы цилиндра) и др.

Нами обнаружены серьезные последствия кавитационной эрозии в СЖО автотранспортных двигателей (рис.2).

Кавитационная эрозия может быть предотвращена или снижена путем исключения условий для образования кавитационных явлений, подбором материалов, хорошо противостоящих кавитации, использованием специальных покрытий, специальными химическими добавками в ОЖ для снижения кавитации (типа зарубежных присадок SCA (Borate-Nitrite) и DCA-4 (Phosphate-molybdate)).



Рис. 2. Последствия кавитационной эрозии в элементах СЖО

Следует отметить, что загрязненная жидкость более склонна к проявлению кавитационных явлений, т.к. мелкие твердые частички загрязнений становятся центрами возникновения кавитационных пузырьков [13]. Таким образом, с повышением загрязнения ОЖ вероятность возникновения кавитационных явлений существенно возрастает.

Масляные и жировые отложения могут возникнуть в СЖО при попадании моторного масла в ОЖ. Это может произойти при разрушении прокладок, при ослаблении затяжки прокладок и т.п.

Продукты разложения антифриза и отработанных присадок могут появиться как результат старения антифриза или при использовании некачественного антифриза.

Старение антифриза и его разложение с образованием характерного осадка является естественным процессом [14]. Для предотвращения последствий старения антифриза необходима его регулярная замена и постоянный контроль его состояния в процессе эксплуатации.

Часто в эксплуатации можно столкнуться с некачественным антифризом, в состав которого входят такие недопустимые компоненты, как глицерин и метиловый спирт. В этом случае антифриз, кроме своего быстрого разложения и превращения в бурю жидкость повышенной вязкости, может вызвать разъедание деталей СЖО из алюминиевых сплавов.

Образование накипи является характерным процессом для СЖО автотранспортных двигателей. Физико-химические процессы образования накипи можно разделить на 2 стадии:

- возникновение первичных зародышей микрокристаллов в твердой фазе;
- процесс роста зародышей, результатом которого является образование плотных отложений.

Вероятность образования накипи при применении современных антифризов целиком и полностью определяется качеством воды, входящей в состав антифриза. При использовании дистиллированной воды хорошего качества образование накипи можно свести к нулю.

Разрушение уплотнительных элементов может происходить из-за их старения в условиях тяжелой эксплуатации. В этом случае возможно как нарушение герметичности внутренних каналов в двигателе, так и попадание фрагментов этих элементов в СЖО.

На рис. 3 в качестве примера показан элемент термостата с разрушившимся уплотнительным элементом.

Результаты эксплуатационных испытания разработанного нами гидроциклонного фильтра-сепаратора позволили непосредственно установить фракционный и химический состав загрязнений в СЖО городских автобусов (MAN, Mercedes).



Рис.3. Клапан термостата с разрушившимся уплотнительным резиновым элементом

Кроме источников образования загрязнений внутри СЖО, представляет интерес их фракционный и химический состав.

Для фракционного анализа загрязнений использовался комплект лабораторных сит (7 штук) производства ООО «Вибротехник», г. Санкт-Петербург. Все сита имели диаметр 128 мм и высоту 37,5 мм. Просеивающая поверхность сетки нормальной точности в соответствии с ГОСТ 6613-86 (ТУ-14-4-167-91). Размер ячеек сит составлял от 1500 до 50 мкм.

Далее каждая из фракций эксплуатационных загрязнений подвергалась химическому анализу с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра последовательного анализа ARLADVANT'X (Thermo Scientific (США), № 38436-08 в Государ-

ственном реестре средств измерений). Эти исследования проводились в Центре «Функциональные наноматериалы» кафедры «Литейные процессы и конструкционные материалы» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.

В процессе исследований было обработано 10 проб из разных фильтров (в каждой пробе представлены все фракции с размером частиц от 50 до 1500 мкм). Результаты химического анализа сведены в обобщающую таблицу.

Следует отметить, что у различных объектов испытаний (автобусов) нет большого различия в химическом составе загрязнений (за редким исключением), что свидетельствует о некоторых внутренних закономерностях образования загрязнений в близких условиях у сходных объектов.

Таблица

Обобщенные данные по относительному химическому составу твердых частиц загрязнений, содержащихся в антифризе

Размер частиц по группам, мкм	Доля отдельных химических элементов, % (масс.)								
	Fe	Pb	Si	Sn	Zn	Al	Ca	Cu	Mg
≥ 1500	15,9-20,0	14,0-18,0	14,4-19,9	6,0-14,1	8,6-18,0	7,4-9,6	2,4-5,9	5,5-10,8	1,8-2,5
1000...1500	20,2-21,5	16,1-27,8	10,5-19,3	9,8-11,1	7,4-12,2	3,3-7,8	2,1-6,7	5,3-8,1	0,96-3,1
700...1000	21,2-25,4	12,7-15,7	18,1-19,4	2,5-8,7	7,2-10,6	7,7-12,8	5,5-6,2	5,1-9,1	2,4-2,9
450...700	29,8-38,3	9,6-12,1	17,6-20,1	1,6-2,2	5,2-12,1	7,4-8,7	5,3-5,7	4,5-8,8	2,4-3,0
250...450	33,8-47,1	7,7-12,1	19,1-24,0	0,9-1,3	3,4-11,9	5,7-6,9	3,4-4,2	3,3-7,3	2,0-2,5
100...250	25,7-44,2	7,9-9,5	29,8-31,1	0,56-0,8	2,5-5,9	5,1-7,7	3,1-9,2	2,8-4,5	1,4-2,7
50...100	16,0-33,2	5,5-7,1	31,7-36,7	0,26-0,35	2,9-3,4	7,0-8,8	8,1-17,1	2,8-3,5	2,8-4,1
≤ 50	13,7-21,8	5,0-5,8	35,2-36,4	0,22-0,30	2,9-3,2	8,4-9,3	13,2-19,3	3,2-3,7	4,0-4,3

Примечание: кроме указанных химических элементов в твердых загрязнениях присутствуют на уровне менее 1,0% (масс.) такие химические элементы, как калий K, натрий Na, титан Ti, фосфор P, сера S, хром Cr, молибден Mo, хлор Cl, иридий Ir, никель Ni, марганец Mn и др. Незначительное содержание этих элементов можно считать фоновым и не принимать во внимание.

Нельзя не заметить значительного количества частиц железа среди загрязнений – от 13,7 до 47,1%. Особенно много частиц Fe в группах 450...750 мкм, 250...450 мкм, 100...250 мкм, 50...100 мкм. То есть это довольно крупные частицы с размерами 700...50 мкм. Природа их появления в антифризе – кавитационные и коррозионные разрушения гильз цилиндров двигателей и других деталей из черных металлов.

Кроме этого обращает на себя внимание значительное количество кремния Si (песка) в общей массе загрязнений – от 14,4 до 36,7%. Наличие песка в антифризе может быть объяснено как производственно-технологическими причинами его попадания в рубашку двигателя (при его изготовлении), так и внешним путем внесения вследствие невысокой культуры эксплуатации техники.

Наличие в загрязнении частиц свинца Pb и олова Sn объясняется содержанием этих элементов в припое, которым пропаяются радиаторы двигателя и отопителя. Таким же путем может попадать и цинк Zn в состав загрязнений.

Появление частиц алюминия Al является следствием кавитационной эрозии деталей двигателя из алюминиевых сплавов.

Частицы кальция Ca входят в состав накипи, отлагающейся на стенках системы охлаждения двигателя при использовании некачественного антифриза.

Частицы меди Cu и магния Mg могут содержаться как в припое, используемом при сборке радиатора, так и в других элементах двигателя.

Обобщенно анализируя состав загрязнений, можно отметить, что наиболее опасными и присутствующие в значительных количествах являются частицы железа Fe и кремния Si. То есть, по сути, антифриз представляет собой своеобразный раствор абразива, действующего на внутреннюю поверхность различных радиаторов, сальник насоса, крыльчатку, клапан термостата и др. Это воздействие может быть весьма опасным и приводить к выходу элементов двигателя из строя.

Выводы и предложения

1. Обобщенной причиной появления загрязнений различной природы в СЖО является физико-химическое взаимодействие ОЖ (антифриза) с различными элементами и разнородными материалами системы охлаждения.

2. Применение абсолютно чистой охлаждающей жидкости в СЖО автотранспортных двигателей **практически невозможно**, потому, что всегда будут существовать эксплуатационные условия, способствующие образованию загрязнений.

3. Суспензия антифриза с твердыми частицами загрязнений представляет собой по сути абразив, действующий на внутреннюю поверхность элементов системы охлаждения, что может быть весьма опасным и приводить к выходу этих элементов из строя. В связи с этим в составе автотранспортных средств должны быть использованы высокоэффективные фильтры охлаждающей жидкости, удаляющие эти загрязнения из потока.

Список литературы

1. Системы охлаждения поршневых ДВС: монография / И.Е. Иванов и др. – М.: МАДИ, 2015. – 168 с.
2. Системы охлаждения тракторных и автомобильных двигателей. Конструкция, теория, проектирование / А.И. Якубович и др. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2014. – 473 с.
3. Руководство по продуктам для системы охлаждения. – Cummins Filtration, 2009. – 8 с.
4. Engine cooling. – Behr Hella Service GmbH., 2008, 52 pp.
5. Engine Liquid Filtration. – Minneapolis: Donaldson Company Inc., 2014, 156 pp.
6. Eaton E.R., Duvnjak E. Examinations of Extended Life Heavy Duty Engine Coolant Filters // SAE Pap. 2004-01-0157. 10 pp.
7. Драгомиров С.Г. и др. Высокоэффективная фильтрация охлаждающей жидкости – новое пер-

спективное направление совершенствования транспортные двигателей. – Разработка и производство двигателей и других агрегатов и систем с применением информационных технологий. – М.: Издат. Дом «Научная библиотека», 2015. – 315 с.

8. Патент РФ на изобретение № 2625891 «Гидроциклонное устройство для очистки от твердых частиц загрязнений охлаждающей жидкости поршневых двигателей // Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С., Эйдель П.И., Гамаюнов А.Ю., Селиванов Н.М. – 2017. – 10 с.

9. Борисов Г.А., Маслова Л.А. Повышение коррозионной стойкости конструктивных материалов системы охлаждения автотракторных двигателей / Г.А. Борисов, Л.А. Маслова // Вестник Рязанского государственного агро-технического университета. – 2011. – №2(10). – С.51-56

10. Ярославцева О.В. Коррозия и защита металлов / О. В. Ярославцева, Т. Н. Останина, В. М. Рудой, И. Б. Мурашова // Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального ун-та, 2015. – 90 с.

11. Лазуткина О. Р. Химическое сопротивление и защита от коррозии

/О. Р. Лазуткина// – Екатеринбург: Изд-во Урал. федерального ун-та, 2014. – 140 с.

12. Семенова И.В. и др. Коррозия и защита от коррозии /И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов// – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 416 с.

13. Смородов Е.А. и др. Физика и химия кавитации / Е.А. Смородов., Р.Н. Галиахметов, М.А. Ильгамов// – М.: Наука, 2008. — 208 с.

14. Наглюк М.И. и др. Уточнение сроков смена антифризов при эксплуатации/ М.И.Наглюк и др.//Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». - Луцьк, 2014. - Вип № 45. – С.371-375

УДК 621.317

Ермаков В.Ф., Власов М.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ В АВТОТРАНСФОРМАТОРЕ НА РАЙОННОЙ ПОДСТАНЦИИ А-20

Аннотация. В статье выполнено исследование переходных тепловых процессов автотрансформатора АТДЦТН-125/220/110 в процессе его эксплуатации при известном суточном графике нагрузки.

Ключевые слова: автотрансформатор, максимальная температура, наиболее нагретая точка обмотки, нагрузка автотрансформатора.

Актуальность темы статьи обусловлена значительными погрешностями используемых в настоящее время методов определения расчетной мощности нагрузки [1 – 11], разнообразием конструкций силовых трансформаторов [12, 13], а также протекающих в них тепловых процессов [14, 15].

Расчетная математическая модель, позволяющая исследовать тепловые процессы в кабеле, разработана профессором Брагиным С.М. [15], она описывается дифференциальным уравнением нагрева первого порядка. В [16] эта модель адаптирована для выбора номинальной мощности любого силового оборудования. Используем эту модель для исследования тепловых процессов в обмотке

трансформатора (возможность такого применения проверена экспериментально [17])

$$\tau \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = (\Theta_{ном} - \Theta_0) \cdot \left[\frac{I(t)}{I_{ном}} \right]^2 + \Theta_{окр}; (1)$$

где Θ – температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора;

$\Theta_{ном}$ □ номинальная длительно допустимая температура изоляции;

$\Theta_{окр}$ □ температура окружающей среды;

τ – постоянная времени нагрева обмотки;

$I(t)$ – ток нагрузки в момент времени t ;

$I_{ном}$ □ номинальный ток трансформатора.

В качестве исходных данных в настоящей статье использован суточный график нагрузки микрорайона г. Азов Ростовской области. Потребители

микрорайона получают питание от районной подстанции А-20, на которой установлены 2 автотрансформатора АТДЦТН-125/220/110. Потребителями микрорайона являются население г. Азов, элеватор и металлургический завод АОМЗ.

Ниже приведены суточные графики активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощности, заданные с почасовой точностью.

P , МВт

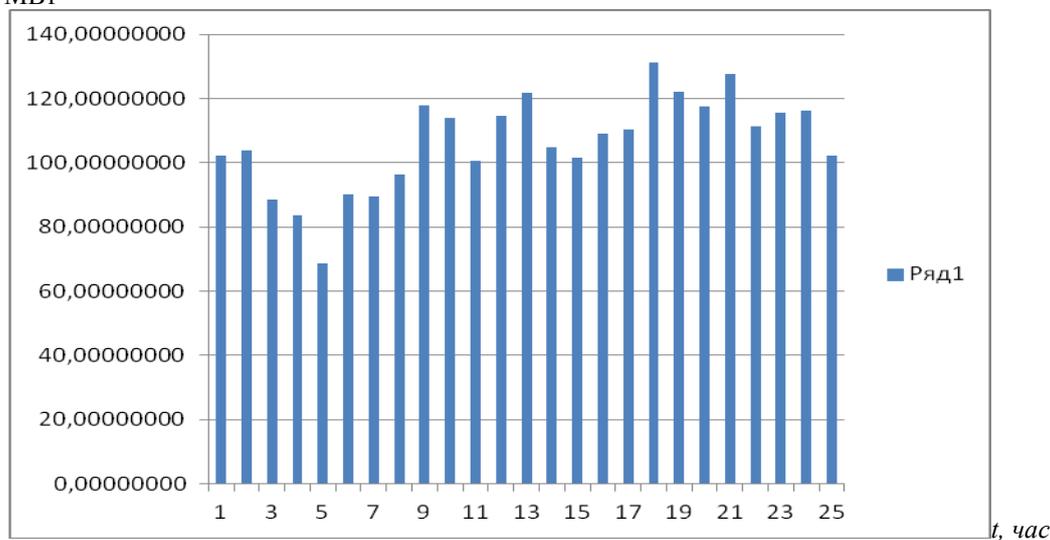


Рис. 1. Суточный график изменения активной мощности $P(t)$

Q , Мвар

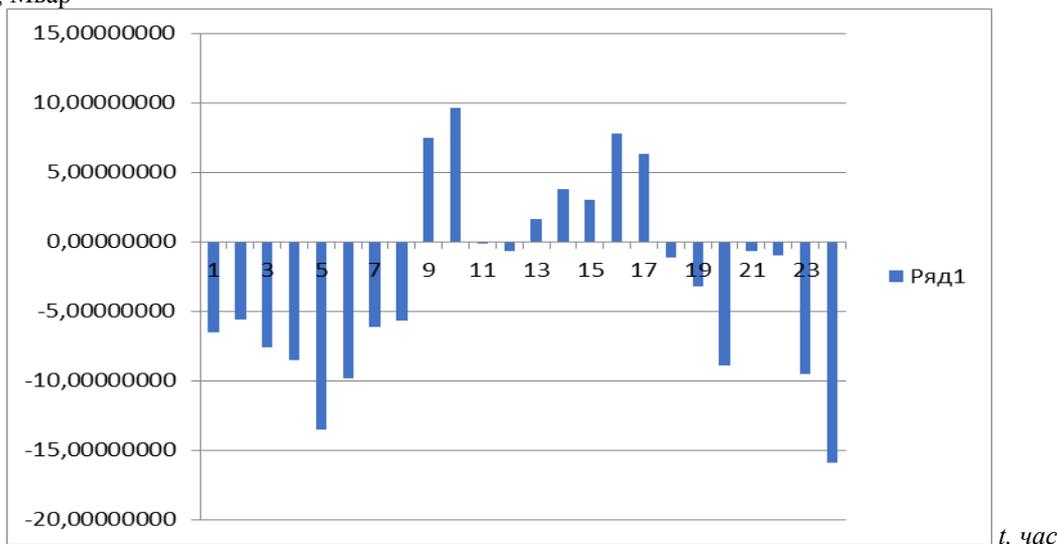


Рис. 2. Суточный график изменения реактивной мощности $Q(t)$

На районной подстанции в качестве источников реактивной мощности установлены батареи статических конденсаторов (БСК), управляемые автоматическим регулятором (см., например, [18]). В связи с малостью ординат суточного графика изменения реактивной мощности $Q(t)$ энергорайона этот график в дальнейших расчетах не учитывается, поскольку учет графика $Q(t)$ мало влияет на протекание тепловых процессов в автотрансформаторах.

При существующем графике нагрузки (см. рис. 1) процесс изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки автотрансформатора

мощностью 125 МВА имеет вид, изображенный на рис. 3.

Учитывая, что номинальная длительно допустимая температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, согласно ГОСТ 14209-97 [18], составляет $\Theta_{обм\ ном} = 98\text{ }^{\circ}\text{C}$, можно считать успешной проверку автотрансформаторов мощностью 125 МВА, выбранных для питания населения г. Азов, элеватора и металлургического завода АОМЗ. $\Theta_{обм},\text{ }^{\circ}\text{C}$

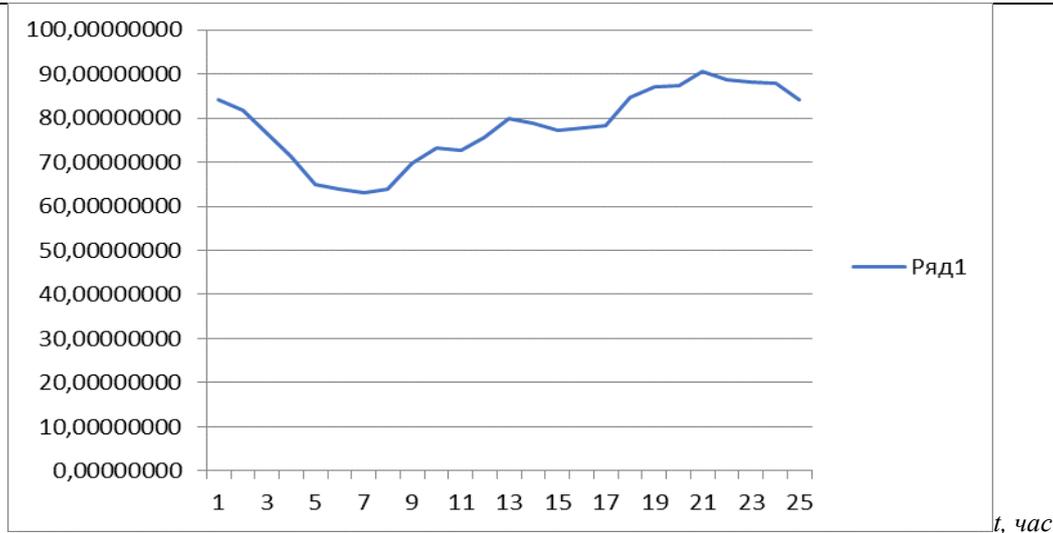


Рис. 3. Суточный график изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора $\Theta_{\text{обм}}$ номинальной мощности 125 МВА при температуре окружающей среды $\Theta_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$; $\Theta_{\text{обм.макс}} = 96,65^\circ\text{C}$

Процесс изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора $\Theta_{\text{обм}}$ (см. рис. 3) получен путем решения дифференциального уравнения (1), постоянная времени нагрева обмотки автотрансформатора равна $\tau = 3,75$ часа; она была определена методом интерполяции по данным [16] для трансформатора мощностью 63 МВА $\tau = 3,5$ часа и автотрансформатора мощностью 250 МВА $\tau = 4,8$ часа.

Вывод: Расчет переходного процесса температуры наиболее нагретой точки обмотки автотрансформатора АДЦТН-125/220/110 подтвердил правильность выбора его мощности на стадии проектирования.

Список использованной литературы

1. Электрические нагрузки промышленных предприятий /С.Д. Волобринский, Г.М.Каялов, П.Н.Клейн и др. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
2. Волобринский С.Д. Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий. – Л.: Энергия, 1976. – 128 с.
3. Расчет электрических нагрузок промышленных предприятий и задачи его осуществления //Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. – 1978. – № 3. – С. 13 – 18.
4. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
5. Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
6. Кудрин Б.И. О комплексном методе расчета электрических нагрузок //Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – № 2. – С. 209 – 210.
7. Дроздов В.А., Фридман С.А. О точности расчетов электрических нагрузок промышленных предприятий //Промышленная энергетика. – 1978. – № 2. – С. 29 – 32.

8. Кудрин Б.И., Лосев Э.А. О необходимой точности методов расчета электрических нагрузок и оценки надежности систем электроснабжения промышленных предприятий //Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – № 12. – С. 1448 – 1451.

9. Вагин Г.Я. О причинах завышения расчетных нагрузок по нагреву //Промышленная энергетика. – 1980. – № 3. – С. 28 – 29.

10. Ермаков В.Ф. Анализ составляющих погрешности определения расчетной электрической нагрузки /Электрические нагрузки и электропотребление в новых условиях хозяйствования: Материалы семинара. – М.: МДНТП, 1989. – С. 93 – 96.

11. Ермаков В.Ф. Исследование процессов в электрических сетях: методы, средства, детерминированные и вероятностные модели. – Ростов н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 2003. – 288 с.

12. Силовые трансформаторы: Справочная книга /Под ред. С.Д. Лизунова, А.Е. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004.

13. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов /Пер. с венг. Под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.

14. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 176 с.

15. Брагин С.М. Электрический и тепловой расчет кабеля. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 328 с.

16. Ермаков В.Ф., Зайцева И.В. Выбор электрооборудования по нагреву. – Ростов н/Д: ЗАО «Книга», 2018. – 176 с.

17. Ермаков В.Ф., Балыкин Е.С., Еволенко Н.А. и др. Опытное определение постоянной времени нагрева электрооборудования // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2012. – № 1. – С. 66 – 68.

18. Красник В.В. Автоматические устройства для компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

18. ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91) Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. – Минск: Межгосуд. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 80 с.

Ермаков В.Ф., Морозов А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА РАЙОННОЙ ПОДСТАНЦИИ АС-10

Аннотация. В статье выполнено исследование переходных тепловых процессов трансформаторов ТРДН-40/110/10/10 в процессе его эксплуатации при существующем графике нагрузки.

Ключевые слова: трансформатор, максимальная температура, наиболее нагретая точка обмотки, загрузка трансформатора.

Актуальность темы статьи обусловлена значительными погрешностями используемых в настоящее время методов определения расчетной мощности нагрузки [1 – 5], разнообразием конструкций силовых трансформаторов [6, 7], а также протекающих в них тепловых процессов [8, 9].

Расчетная математическая модель, позволяющая исследовать тепловые процессы в кабеле, разработана профессором Брагиным С.М. [8], она описывается дифференциальным уравнением нагрева первого порядка. В [10] эта модель адаптирована для выбора номинальной мощности любого силового оборудования. Используем эту модель для исследования тепловых процессов в обмотке трансформатора (возможность такого применения проверена экспериментально [11])

$$\tau \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = (\Theta_{ном} - \Theta_0) \cdot \left[\frac{I(t)}{I_{ном}} \right]^2 + \Theta_{окр}; (1)$$

где Θ – температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора;

$\Theta_{ном}$ – номинальная длительно допустимая температура изоляции;

$\Theta_{окр}$ – температура окружающей среды;

τ – постоянная времени нагрева обмотки;

$I(t)$ – ток нагрузки в момент времени t ;

$I_{ном}$ – номинальный ток трансформатора.

В качестве исходных данных в настоящей статье использованы суточные графики нагрузки четырех секций РУ 10 кВ подстанции, которые питают потребителей: аэропорта «Платов», пос. Грушевский, микрорайона г. Новочеркаска Ростовской области, и др.

Ниже приведены суточные графики активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ мощности, заданные с почасовой точностью, для всех 4 секций, а так же их суммарный график.

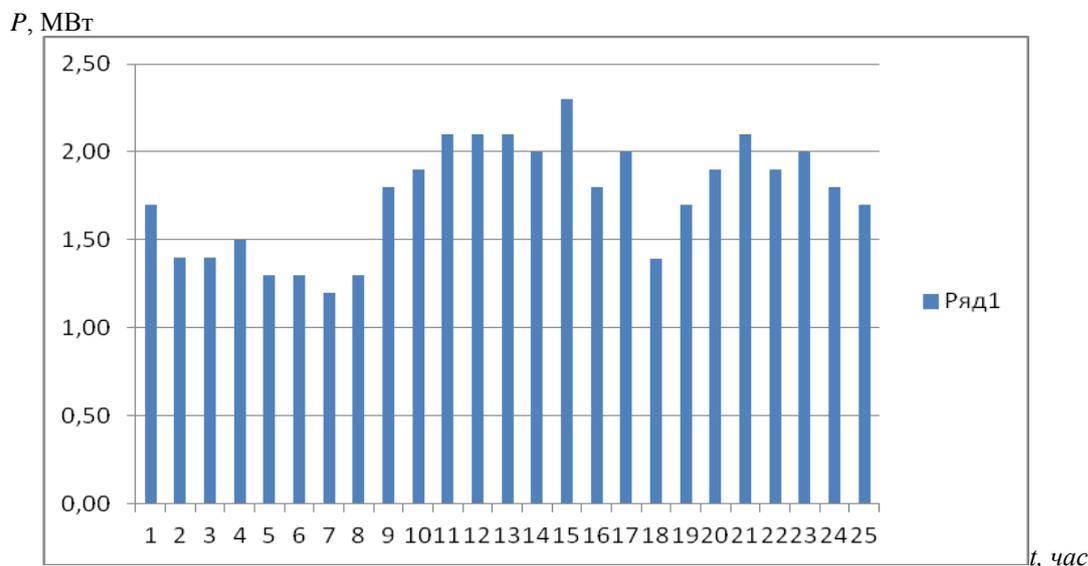


Рис. 1. Суточный график изменения активной мощности $P(t)$ первой секции

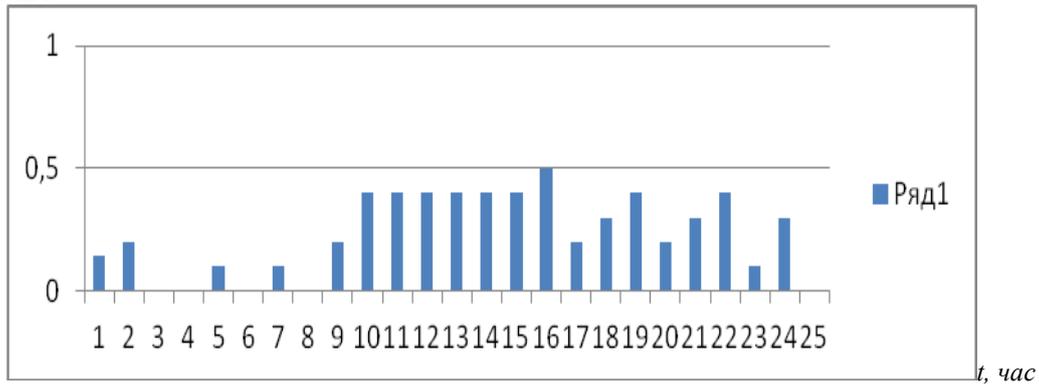
Q , МВт


Рис. 2. Суточный график изменения реактивной мощности $Q(t)$ первой секции

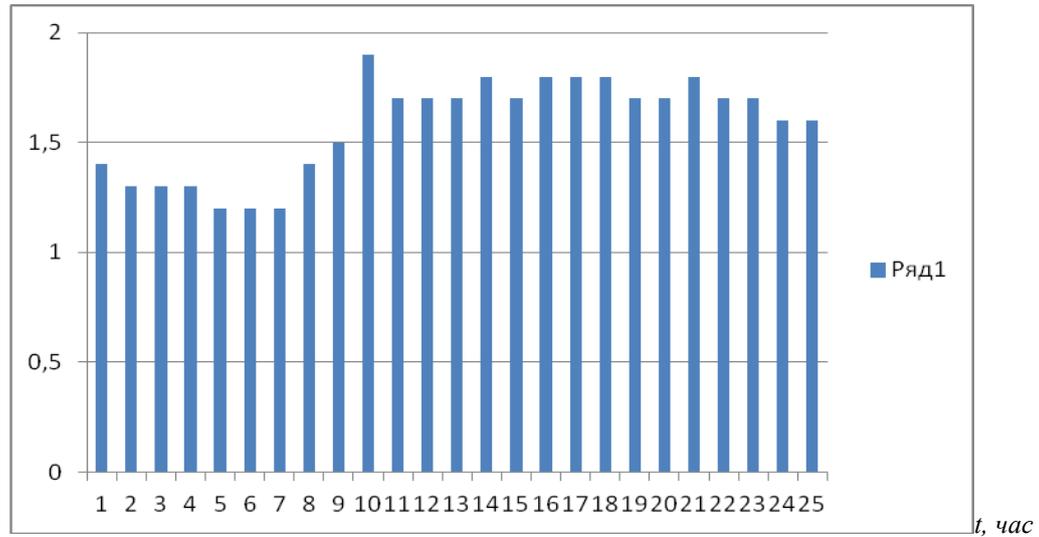
 P , МВт


Рис. 3. Суточный график изменения активной мощности $P(t)$ второй секции

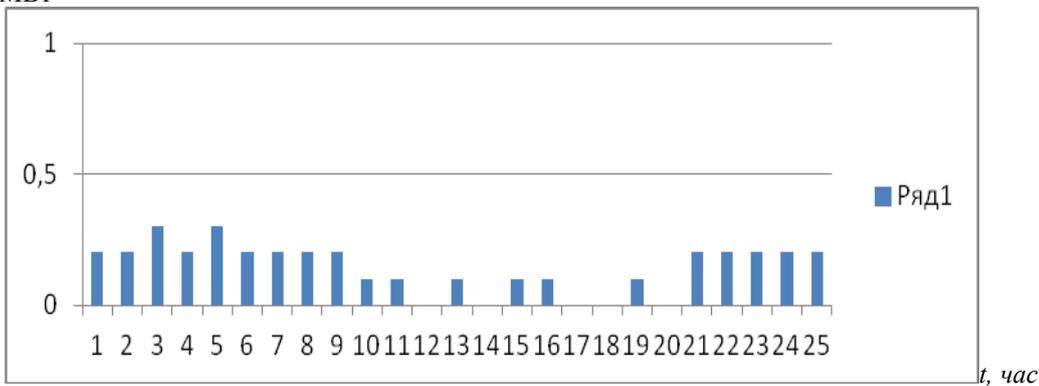
 Q , МВт


Рис. 4. Суточный график изменения реактивной мощности $Q(t)$ второй секции

P , МВт

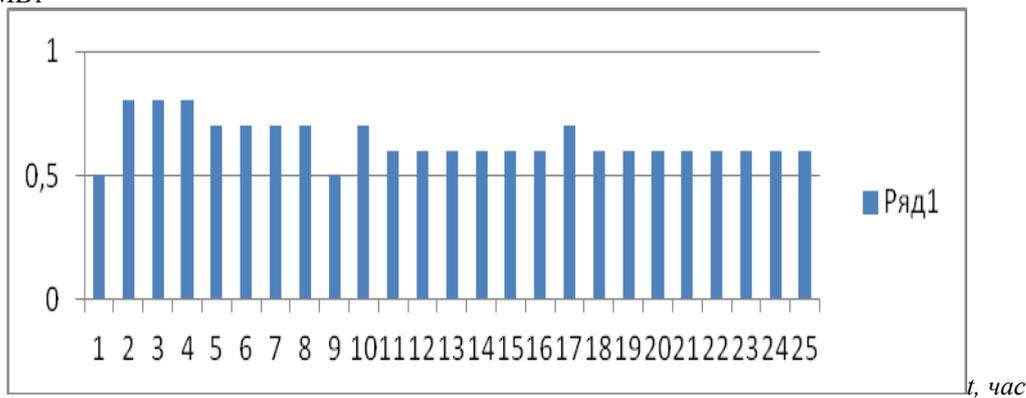


Рис. 5. Суточный график изменения активной мощности $P(t)$ третьей секции

Q , МВт

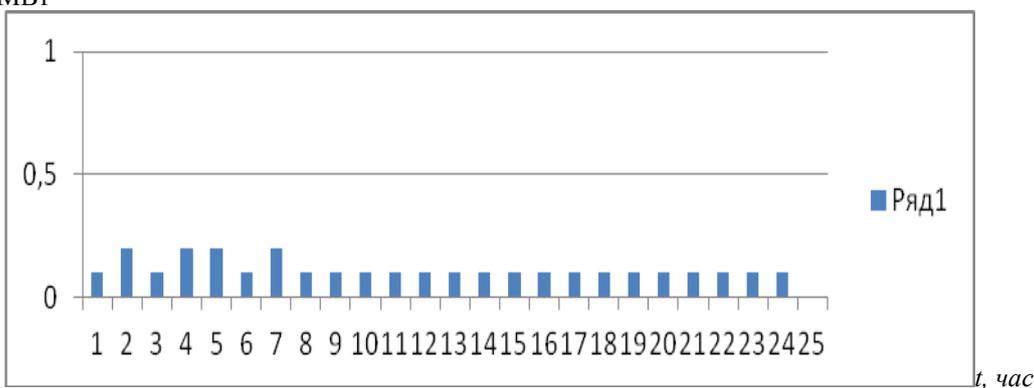


Рис. 6. Суточный график изменения реактивной мощности $Q(t)$ третьей секции

P , МВт

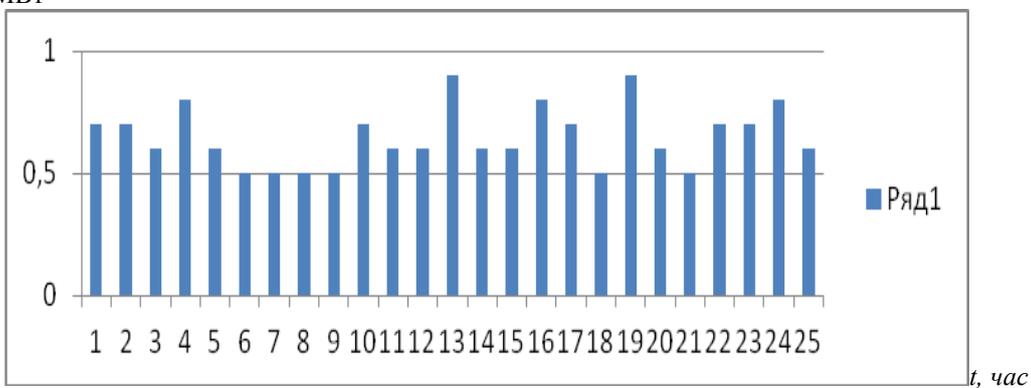


Рис. 7. Суточный график изменения активной мощности $P(t)$ четвертой секции

Q , МВт

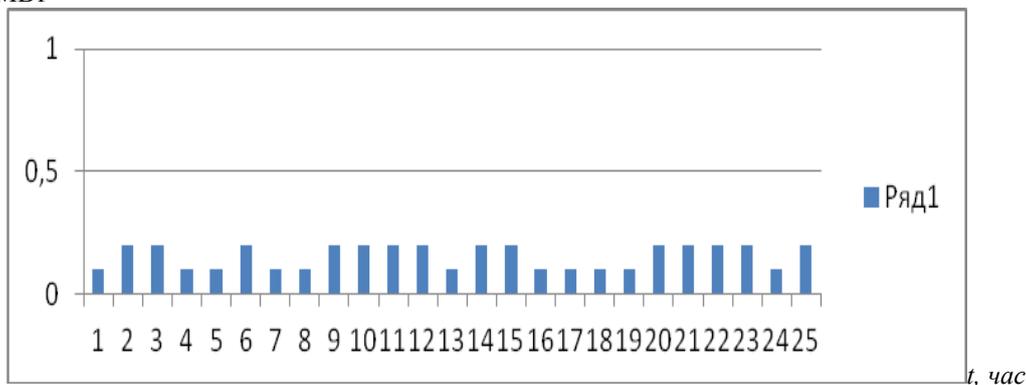


Рис. 8. Суточный график изменения реактивной мощности $Q(t)$ четвертой секции

В связи с малостью ординат суточного графика изменения реактивной мощности $Q(t)$ энергорайона этот график в дальнейших расчетах не учитывается, поскольку учет графика $Q(t)$ мало влияет на протекающие тепловые процессы в автотрансформаторах.

Принимается приближенно при проведении расчетов, что $S \approx P$.

Для определения загрузки трансформаторов на подстанции используем суточный график изменения суммарной активной мощности $P(t)$ мощности всех 4 секций.

Суточный график суммарной активной $P(t)$ мощности нагрузки приведен на рис. 9, а суммарной реактивной $Q(t)$ – на рис. 10.

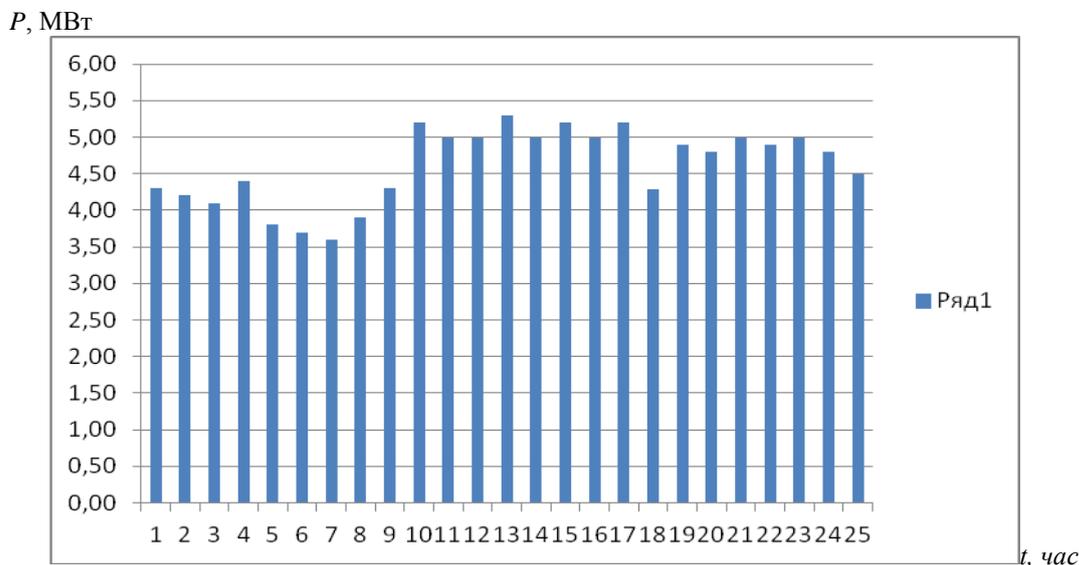


Рис. 9. Суточный график изменения суммарной активной мощности $P(t)$ всех 4 секции

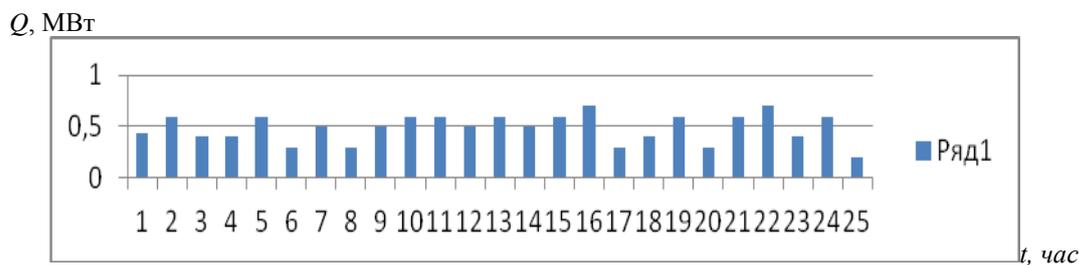


Рис. 10. Суточный график изменения суммарной реактивной мощности $Q(t)$ всех 4 секции

По суточному графику нагрузки $P(t)$ (рис.9) может быть:

- 1) Определена загрузка трансформаторов;
- 2) Выбрана мощность силовых трансформаторов на подстанции, достаточная для питания присоединенной нагрузки.

В проектной практике общепринятым является метод выбора мощности трансформатора S по средней мощности за наиболее загруженную смену предприятия $S_{см}$. Средняя мощность за сутки по графику нагрузки на рисунке 9 составляет $P_{ср} = 4,62$ МВт. Значение $P_{ср}$ автоматически рассчитывается программой, приведенной в [10]. При дальнейших расчетах и выводах принято использование в качестве средней мощности $P_{ср}$.

При реконструкции подстанции первоначально был установлен трансформатор, номинальная мощность которого составляла $S = 40$ МВА.

Если принять во внимание существующий график нагрузки (рис. 9) загрузка трансформатора при

питании всех 4 секций составляет всего 11,5%. Это означает, что мощность выбрана излишне и можно было обойтись менее мощными трансформаторами.

В настоящее время принято выбирать мощность силовых трансформаторов на районных ПС и ГПП по средней суммарной мощности, которая равна 4,62 МВт. Расчетную мощность трансформатора с учетом допустимой перегрузки в аварийном режиме на 40 % выбираем по формуле:

$$P_1 = P_{ср} / 1,4 = 3,3 \text{ МВт.}$$

Предварительно выбираем ближайшую мощность трансформатора по шкале стандартных мощностей $S = 4$ МВА.

Проверим, проходит ли выбранный трансформатор мощностью $S = 4$ МВА по максимальному нагреву (используя расчетный математический аппарат [10]).

4	4,30	98	20	90,13875	1,7	4.62042	0,15	1	0	0,55530637	0,44469363	91,28496513	4,66951847	2033,94	111,2849651
	4,20			85,99500000					1			88,93255135	3,55436333		108,9325513
	4,10			81,94875000					2			85,82689940	2,47916133		105,8268994
	4,40			94,38000000					3			89,63040873	3,85406106		109,6304087
	3,80			70,39500000					4			81,07654505	1,42886329		101,0765450
	3,70			66,73875000					5			74,70061897	0,68199824		94,70061897
	3,60			63,18000000					6			69,57747313	0,37643379		89,57747313
	3,90			74,14875000					7			71,61029082	0,47653874		91,61029082
	4,30			90,13875000					8			79,84977854	1,23933421		99,84977854
	5,20			131,82000000					9			102,9606048	18,0912818		122,9606048
	5,00			121,87500000					10			111,3717158	47,9960652		131,3717151
	5,00			121,87500000					11			116,0424593	82,5104774		136,0424593
	5,30			136,93875000					12			125,3349066	242,463011		145,3349066
	5,00			121,87500000					13			123,7963082	202,830722		143,7963082
	5,20			131,82000000					14			127,3643928	306,822549		147,3643928
	5,00			121,87500000					15			124,9232948	231,158170		144,9232941
	5,20			131,82000000					16			127,9902156	329,924887		147,9902156
	4,29			89,71998750					17			110,9716890	45,8197827		130,9716890
	4,90			117,04875000					18			113,6741193	62,6897429		133,6741193
	4,80			112,32000000					19			113,0719511	58,4602086		133,0719511
	5,00			121,87500000					20			116,9866108	92,0605818		136,9866108
	4,90			117,04875000					21			117,0142437	92,3561476		137,0142437
	5,00			121,87500000					22			119,1757917	118,675367		139,1757917
	4,80			112,32000000					23			116,1270644	83,3242379		136,1270644
	4,50			90,13875000					0			104,5702266			124,5702266
$P_{н\text{ом}}$	P	$\Theta_{н\text{ом}}$	$\Theta_{о\text{кр}}$	$\Theta_{уст}$	τ	$P_{ср}$	$P_{в}$	ΔT	T	$EXP(\Delta T/\tau)$	$1-EXP$	Θ	$EXP(0,116^* (50-\Theta))$	SUM	$\Theta_{обм}$

Рис.11. Скриншот используемой программы.

$\Theta_{обм}, ^\circ C$

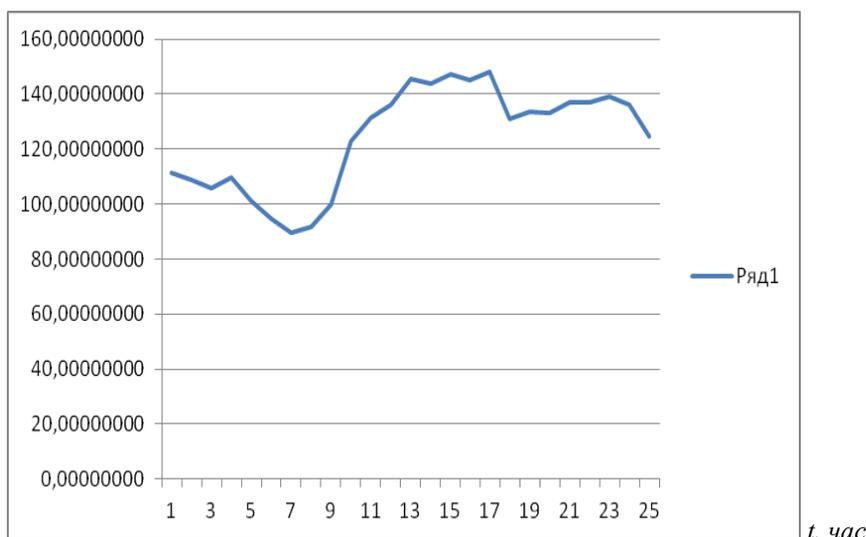


Рис.12. Суточный график изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора $\Theta_{обм}$ номинальной мощности 4 МВА при температуре окружающей среды $\Theta_{окр} = 20 \text{ }^\circ C$; $\Theta_{обм.макс} = 147,99 \text{ }^\circ C$

Процесс изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора $\Theta_{обм}$ (рис. 12) получен путем решения дифференциального уравнения (1), в котором вместо отношения $I(t)/I_{ном}$ использовано отношение $P(t)/P_{ном}$; постоянная нагрева равна $\tau = 1,7$ часа.

Предельное значение температуры наиболее нагретой точки трансформатора в режиме систематических нагрузок согласно ГОСТ 14209-97 [12] составляет $140 \text{ }^\circ C$, а в режиме кратковременных перегрузок $160 \text{ }^\circ C$. Суточный график изменения температуры (рис.12) показывает что при имеющемся суточном графике суммарной нагрузки (рис.9)

трансформатор будет перегреваться до недопустимой температуры $147,99 \text{ }^\circ C$ более 5 часов, что значительно больше постоянной времени нагрева данного трансформатора (1,7 час; данное условие предписывает ГОСТ 14209-97 [12]), и эти нагрузки не могут считаться кратковременными.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что трансформатор мощностью 4 МВА не подходит при выборе по максимальному нагреву.

При продолжительности ремонта в несколько суток износ изоляции трансформатора составит $2034/24 = 85$ суток за 1 сутки.

Проверим нагрев следующего по шкале мощностей трансформатора мощностью 6,3МВА. Результаты расчетов приведены на рис. 13 и 14.

6,3	4,30	98	20	36,3371126	1,8	4.62042	0,15	1	0	0,57375342	0,42624658	42,36215120	0,01601883	0,52	62,36215120
	4,20			34,66666667					1			39,08197724	0,01094918		59,08197724
	4,10			33,03552532					2			36,50469779	0,00811976		56,50469779
	4,40			38,04686319					3			37,16204052	0,00876312		57,16204052
	3,80			28,37792895					4			33,41784301	0,00567588		53,41784301
	3,70			26,90400605					5			30,64134229	0,00411299		50,64134229
	3,60			25,46938776					6			28,43681436	0,00318492		48,43681436
	3,90			29,89115646					7			29,05672271	0,00342238		49,05672271
	4,30			36,33711262					8			32,15996400	0,00490527		52,15996400
	5,20			53,13983371					9			41,10256170	0,01384124		61,10256170
	5,00			49,13076342					10			44,52455522	0,02058584		64,52455522
	5,00			49,13076342					11			46,48793571	0,02585117		66,48793571
	5,30			55,20332577					12			50,20284091	0,03977684		70,20284091
	5,00			49,13076342					13			49,74587155	0,03772324		69,74587155
	5,20			53,13983371					14			51,19253631	0,04461586		71,19253631
	5,00			49,13076342					15			50,31371267	0,04029172		70,31371267
	5,20			53,13983371					16			51,51833709	0,04633429		71,51833709
	4,29			36,16829932					17			44,97543600	0,02169118		64,97543600
	4,90			47,18518519					18			45,91733403	0,02419548		65,91733403
	4,80			45,27891156					19			45,64520864	0,02344365		65,64520864
	5,00			49,13076342					20			47,13091444	0,02785302		67,13091444
	4,90			47,18518519					21			47,15404716	0,02792786		67,15404716
	5,00			49,13076342					22			47,99661570	0,03079532		67,99661570
	4,80			45,27891156					23			46,83820361	0,02692316		66,83820361
	4,50			36,33711262					0			42,36214950			62,36214950
$\frac{P_{н}}{OM}$	P	$\Theta_{н}$ ом	$\Theta_{о}$ кр	$\Theta_{уст}$	τ	$P_{ср}$	ПВ	Δ T	T	EXP($\Delta T/\tau$)	1-EXP	Θ	EXP(0,116* (50- Θ))	SUM	$\Theta_{обм}$

Рис 13. Скриншот используемой программы

Для этого трансформатора процесс изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки изображен на рисунке 14.

$\Theta_{обм}$, C

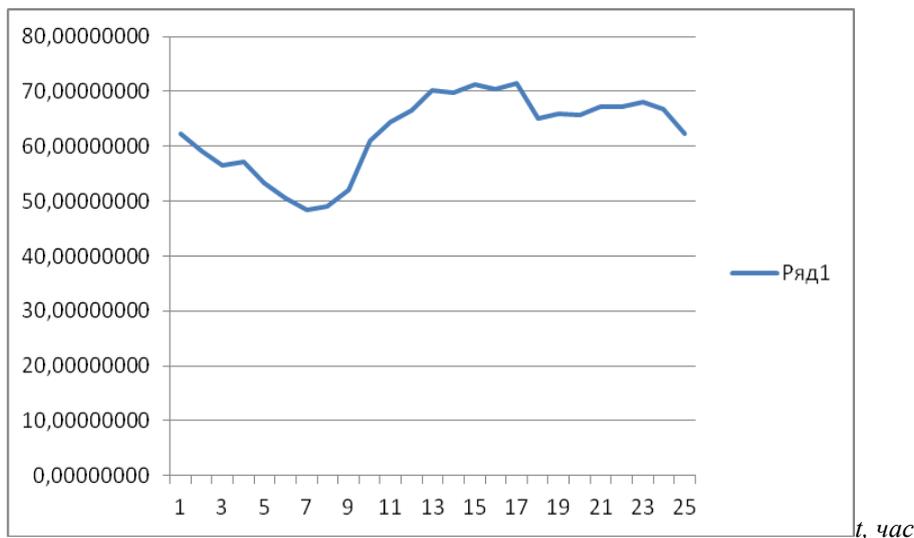


Рис.14. Суточный график изменения температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора $\Theta_{обм}$ номинальной мощности 6,3МВА при температуре окружающей среды $\Theta_{окр} = 20^\circ\text{C}$; $\Theta_{обм.макс} = 71,52^\circ\text{C}$

Согласно ГОСТ 14209-97 [12] номинальная длительно допустимая температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора составляет $\Theta_{обм\ ном} = 98^\circ\text{C}$, можно считать успешным выбор трансформатора мощностью 6,3МВА для питания аэропорта «Платов», пос. Грушевский и остальных потребителей, суточный график нагрузки которых, изображенный на рисунке 9.

Вывод: Выбор трансформаторов при реконструкции был выполнен не правильно, что лишь увеличило стоимость проекта, так как стоимость ТРДН 40000/110/10/10 составляет от 8000000руб., а

стоимость ТМН 6300/110/10/10 от 3500000руб. Учитывая, что подстанция двухтрансформаторная, выгода составляет ≈ 9000000 руб. Выбор трансформаторов мощностью 40 МВА можно считать обоснованным с учетом перспективного плана развития энергетического района.

Список использованной литературы

1. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.

2. Кудрин Б.И. О комплексном методе расчета электрических нагрузок //Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – № 2. – С. 209 – 210.
3. Вагин Г.Я. О причинах завышения расчетных нагрузок по нагреву //Промышленная энергетика. – 1980. – № 3. – С. 28 – 29.
4. Ермаков В.Ф. Анализ составляющих погрешности определения расчетной электрической нагрузки /Электрические нагрузки и электропотребление в новых условиях хозяйствования: Материалы семинара. – М.: МДНТП, 1989. – С. 93 – 96.
5. Ермаков В.Ф. Исследование процессов в электрических сетях: методы, средства, детерминированные и вероятностные модели. – Ростов н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 2003. – 288 с.
6. Силовые трансформаторы: Справочная книга /Под ред. С.Д. Лизунова, А.Е. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004.
7. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов /Пер. с венг. Под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
8. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 176 с.
9. Брагин С.М. Электрический и тепловой расчет кабеля. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 328 с.
10. Ермаков В.Ф., Зайцева И.В. Выбор электрооборудования по нагреву. – Ростов н/Д: ЗАО «Книга», 2018. – 176 с.
11. Ермаков В.Ф., Балыкин Е.С., Еволенко Н.А. и др. Опытное определение постоянной времени нагрева электрооборудования // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2012. – № 1. – С. 66 – 68.
12. ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91) Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. – Минск: Межгосуд. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 80 с.
13. Каталог оборудования ТРАНСФОРМАТОР ТДТН-40000/110-У1 ТРЕХОБМОТОЧНЫЙ. - [HTTP://WWW.STROI-OBORUDOVANIE.RU/GOODS/86664330-TRANSFORMATOR TDTN 40000 110 U1 TREKHOBMOTOCHNY](http://www.stroi-oborudovanie.ru/goods/86664330-TRANSFORMATOR_TDTN_40000_110_U1_TREKHOBMOTOCHNY).
14. Каталог товаров : Трансформатор силовой ТМН 6300/110/10 <https://tiu.ru/p358934263-transformator-silovoj-tmn.html> .

УДК: 655.02.04

Ешбаева Улбосин
доктор технических наук, факультет полиграфии
Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности
Джалилов Анвар
старший преподаватель, полиграфический факультет
Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

ПЕЧАТНЫЕ СВОЙСТВА БУМАГ С ВВЕДЕНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Yeshbaeva Ulbosin,
doktor of technical sciences, the faculty of printing
Tashkent Institute of Textile and Light Industry
E-mail: Guli-67@mail.ru
Djalilov Anvar,
senior teacher, the faculty of printing
Tashkent Institute of Textile and Light Industry
E-mail: anvar8108@yandex.ru

PRINTED PROPERTIES OF PAPER WITH THE INTRODUCTION OF SYNTHETIC POLYMERS

Аннотация: В данной статье изложены результаты определения печатных показателей бумаг, содержащих в композиции хлопковую целлюлозу, отходов синтетического волокна нитрона и отходы натурального шелка. Показана целесообразность использования этих волокнистых материалов для полиграфической промышленности.

Abstract: This article presents the results of the determination of printed indicators of papers containing cotton pulp in the composition, waste of synthetic fiber nitron and waste of natural silk. The feasibility of using these fibrous materials for the printing industry.

Ключевые слова: Хлопковая целлюлоза, полиакрилонатрильные ПАН-волокна, синтетическое волокно-нитрон, отходы натурального шелка.

Key words: Cotton cellulose, polyacrylonitrile PAN-fibers, synthetic fiber-nitron, waste of natural silk.

Введение. К началу 21 века объем мирового производства различных видов бумаги превысил 370 миллионов тонн, при величине её потребления на душу в среднем по миру свыше 50 кг в год [1].

Быстрые темпы развития, которые обусловлены непрерывно возрастающим спросом на бумажную продукцию, имеют ряд серьезных трудностей. Древесная целлюлоза является одним из важнейших

исходных материалов в бумажной промышленности. Однако, в условиях Республики Узбекистан древесная целлюлоза является дефицитным сырьем, отсутствуют достаточные площади с хвойными и лиственными деревьями. Получение целлюлозы или целлюлозной массы из древесины связано со значительным расходом воды [2-3].

В Узбекистане нет достаточных запасов древесины, что определяет актуальность производства волокнистых полуфабрикатов из недревесного растительного сырья в бумажной промышленности. Хлопок – древнейшее культурное растение. В Узбекистане ежегодно образуется на хлопковых полях до 4 млн. тонн стеблей хлопчатника [4]. В хлопкоочистительных производствах выделяется 100-120 тыс. тонн отходов, которые могут служить ценным сырьем для различного назначения [5].

Технология изготовления бумаги в промышленных масштабах из хлопковой целлюлозы экономически нецелесообразна. Добавление в бумажную массу отходов текстильной и химической промышленности позволит решить проблему эффективного и рационального использования сырьевых ресурсов, сэкономить дорогостоящую хлопковую целлюлозу, снизив себестоимость бумаги, значительно сократить потребность в завозе бумаги извне.

Как известно, в Республике Узбекистан ежегодно выпускается более 14 тыс. тонн синтетиче-

ского полиакрилонатрильных ПАН-волокна «нитрон», которое вырабатывается из тройного сополимера (92,5% акрилонитрила, 6,0% метилакрилата, 1,5% итаконовой кислоты) мокрым роданидным способом в виде штапельного волокна и жгута. При этом 25% выпускаемых волокон используется в народном хозяйстве республики, остальные 75% экспортируются [6]. Нитрон широко используется в производстве текстильных полотен, пряжи, трикотажных изделий, применяющихся для изготовления верхнего трикотажа, ковров, плательных и костюмных тканей. В производстве из-за нарушений в технологическом регламенте, при пуске и наладке оборудования, а также по другим причинам накапливается определенное количество брака – отходов полиакрилонатрильных ПАН – волокна. Использование отходов бумажной промышленности поможет решить также важную экологическую проблему утилизации этих отходов.

В данной работе разработан комплекс научно-технических и технологических работ по созданию новых видов бумаг, содержащих отходы хлопкоочистительной и текстильной промышленности Узбекистана.

Исследование данной проблемы: Изготовление опытных партии бумаги и оценку их качества проводили в ООО ИИ “JUNAL QALIN QOG’OZ” по утвержденному технологическому регламенту.

Таблица 1

Объекты исследования

Образец №	Волокнистый состав образцов
№1	100% хлопковой целлюлозы (ХЦ), проклейка в массе канифольным клеем (КК)
№2	85% хлопковой целлюлозы (ХЦ) и 15% отходов нитрона (ОН), проклейка в массе акриловой эмульсией (АЭ)
№3	85% хлопковой целлюлозы (ХЦ) и 15% отходов нитрона (ОН), проклейка в массе продукт алкоголиза полиэтилентерефталата (ПАПЭТФ).
№4	85% хлопковой целлюлозы (ХЦ) и 15% отходов нитрона (ОН), проклейка в массе канифольным клеем (КК)
№5	85% хлопковой целлюлозы (ХЦ) и 15% отходов модифицированного нитрона (МОН), проклейка в массе канифольным клеем (КК)
№6	85% хлопковой целлюлозы (ХЦ) и 15% отходы гидролизованного нитрона, (ГОН) проклейка в массе канифольным клеем (КК)
№7	85% хлопковой целлюлозы (ХЦ), 7,5% отходов нитрона (ОН) и 7,5% отходов натурального шелка (ОНШ), проклейка в массе канифольным клеем (КК)
№8	85% хлопковой целлюлозы (ХЦ) и 15% отходов натурального шелка, (ОНШ) проклейка в массе канифольным клеем (КК)

В связи с более широким применением различных компонентов для достижения определенных печатных свойств, следует: в связи с исследованием вопросов возникает необходимость изучения зависимости ее печатно-технических свойств от вида волокна с целью получения оптимального композиционного состава. Особое значение приобретает установление взаимосвязи между печатными и физико-механическими свойствами бумаги. Качество бумаги для печати оценивается по ряду показателей, основные из которых – разрывная длина, из-

лом, гладкость, белизна, равномерность и впитываемость. Поэтому целью следующих исследований была оценка влияния волокнистого состава опытных образцов бумаги на показатели, характеризующие печатные свойства бумаги.

Результаты и обсуждение: В данной работе для выяснения влияния физико-механических свойств бумаги на качество печати выбрали оптимальные варианты образцов бумаг с различными свойствами. Для изучения печатных свойств бумаги отобраны восемь вариантов (табл. 1).

Зависимость физико-механических свойств экспериментальных бумаг от состава композиции ОН

Наименование показателей	Виды бумаги							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Излом, ч.д.п.	44	259	87	64	42	43	25	42
Зольность, %.	4,0	4,9	4,9	4,6	4,7	4,7	5,6	4,2
Гладкость, с	42	51	50	33	40	43	46	48
Белизна, %	81	86	85	82	84	85	84	83
Разрывная длина, м.	3682	3661	3611	3314	3678	3650	3607	3722

Результаты испытаний показали, что природа химического волокна, соотношение компонентов в композиции бумаги влияет на все физико-механические и печатные свойства бумаги (табл. 2).

Результаты исследования физико-механических свойств бумаги показали, что при использовании акриловой эмульсии улучшаются прочностные показатели. Прочность межволоконных связей зависит от плотности переплетения волокон. Чем ближе располагаются волокна относительно друг друга, тем более прочные связи возникают между ними. С добавлением в бумажную композицию АЭ излом увеличивается на 180% по сравнению с бумагой №2 и бумагой с канифольным клеем №1.

Гладкость определяется свойствами всех элементов, входящих в композицию, образующих граничный слой на поверхности бумаги [7]. Проклеивающие вещества придают бумаге равномерную

структуру, повышают гладкость поверхности (рис.1). Определение микрогеометрии поверхности основан на установлении времени (с), необходимого для прохождения определенного объема воздуха (10 см^3) между поверхностью бумаги и стеклянной полированной пластинкой и выполняется на аппарате Б-1 при растяжении 0,5 ат и давлении на бумагу $9,81 \cdot 10^2$ Па, (ГОСТ 12795-78 и 7317-78, п.4.3).

Приведенные значения гладкости свидетельствуют, что гладкости всех образцов бумаг с введением химических волокон лучше, чем бумаги из №4. Однако, при замене канифольного клея на АЭ (№2) и ПАПЭТФ (№3) эмульсии, приводит к увеличению показателей гладкости на 20%. Введение в состав бумаги ОНШ с ОН в соотношении 1:1 (№7) повышает гладкость на 10%.

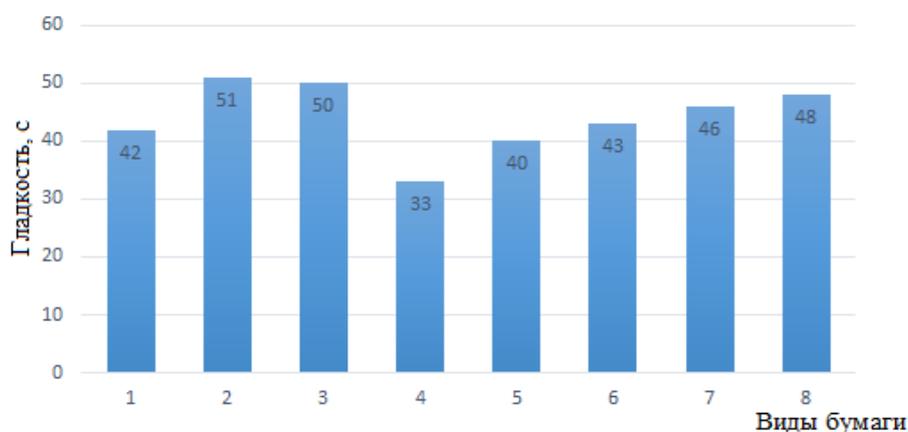


Рис. 1. Диаграмма изменения гладкости от состава бумаги

Данные по гладкости, определенные по Бекку, полученные для всех экспериментальных образцов, находятся в пределах, допустимых для офсетной бумаги (ГОСТ 12795).

Показатели **белизны** оказывают значительное влияние на качество получаемых оттисков [8]. Чем выше белизна, тем контрастнее изображение и тем лучше восприятие цвета (табл.1). Определение белизны бумаг производили на фотоэлектрическом измерителе коэффициента яркости «Macbeth RD 914» по ГОСТ Р51256-99, ИСО 11958 при температуре окружающей среды $21-22^\circ \text{C}$, $W_{\text{отн}}=55-60\%$.

Показатели белизны у исследуемых бумаг колеблются в диапазоне от 81 до 86%. Однако, при замене канифольного клея на АЭ (№2) и ПАПЭТФ (№3), приводит к увеличению показателей белизны

на ~6%. Все образцы бумаги имеют достаточно высокие показатели белизны, удовлетворяющие требованиям многокрасочной печати (ГОСТ 7690).

Разрывная длина характеризует прочность бумаги. Как видно из полученных данных (рис. 2), введение ОН в композицию бумаги №4 при проклейке канифольным клеем, уменьшает разрывную длину на 10 %.

Введение в состав бумаги ОНШ повышает механическую прочность на 2%. Лучшими свойствами обладают все бумаги, особенно МОН, ГОН и проклеенные в массе АЭ и ПАПЭТФ.

Печатные свойства экспериментальных бумаг зависят от состава композиции и значительно превосходят нормативные значения. В этой связи по-

лученные результаты печатных свойств экспериментальных бумаг можно считать положительными (ГОСТ 13525.1).

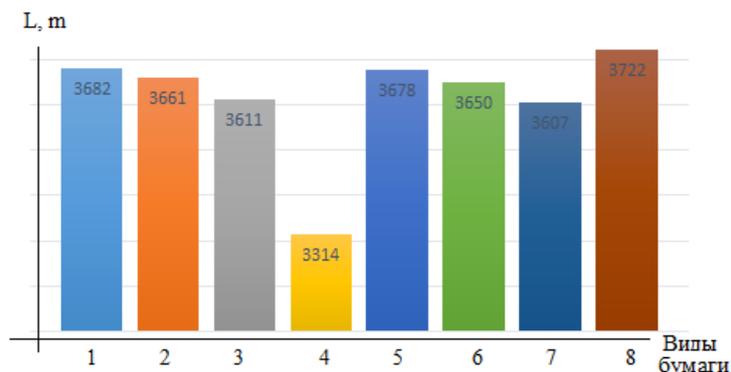


Рис. 2. Диаграмма изменения прочности от состава бумаги

Пористость непосредственно влияет на впитывающую способность бумаги, то есть на ее способность воспринимать печатную краску и вполне может служить характеристикой структуры бумаги [9].

Бумага является пористо-капиллярным материалом; важной печатной характеристикой верхнего слоя бумаги, влияющего на прочность закрепления красочного слоя, считается пористость (рис.3).

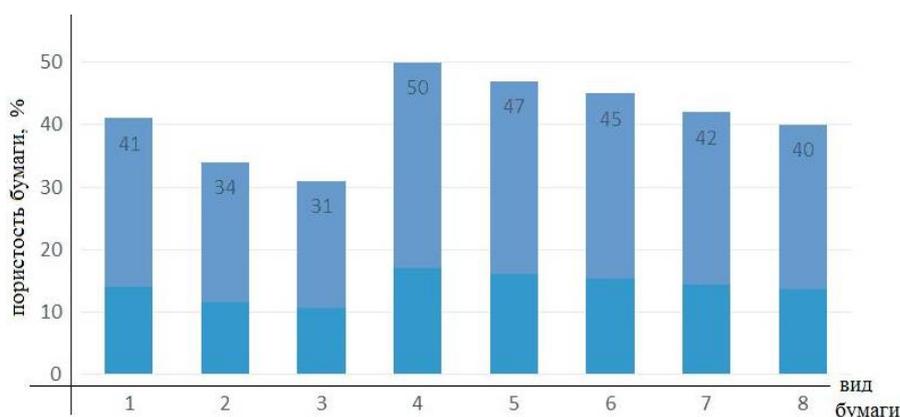


Рис. 3. Диаграмма изменения пористости от состава бумаги

Введение в композицию бумаги отходов синтетических волокон резко изменяет ее структуру, что сказывается и на объемных прочностных свойствах.

Полученные данные показывают, что бумаги №2 и №3 имеют микропористую структуру, так как пористость имеет значения до 35%, остальные бумаги обладают среднепористой структурой, так как значения пористости размещаются в области до 50%.

Показатель пористости влияет на оптические свойства бумаги. Чем выше пористость, тем больше происходит рассеяние света в поверхностном слое бумаги. Проклеивающие вещества, адсорбируясь в виде полидисперсных частиц на поверхности волокон, способствуют уменьшению пор на поверхности бумаги. По принятым нормативам общий объем пор в офсетных бумагах достигает до 60% [O'zDSt 1114:2006].

Такие бумаги хорошо впитывают краску, благодаря своей рыхлой структуре, то есть сильно развитой внутренней поверхности. В этой связи полученные результаты пористости экспериментальных бумаг можно считать положительными.

Впитывающая способность бумаги влияет как на прочность красочного слоя и однородность печати, так и на цветовые характеристики оттиска. Поэтому показатели, характеризующие взаимодействие бумаги с жидкостями можно отнести также к печатно-техническим свойствам [10]. Это особенно актуально, если используется способ офсетной печати. Для процесса закрепления красок большое значение имеет показатель впитывающей способности по ксилолу. Определение показателей впитывающей способности по ксилолу производили согласно описанию на приборе ПВБ. Практически для всех красок офсетной печати первичное закрепление красок связано с впитыванием связующих в поры бумаги. Анализ полученных результатов приведен на рис.4.

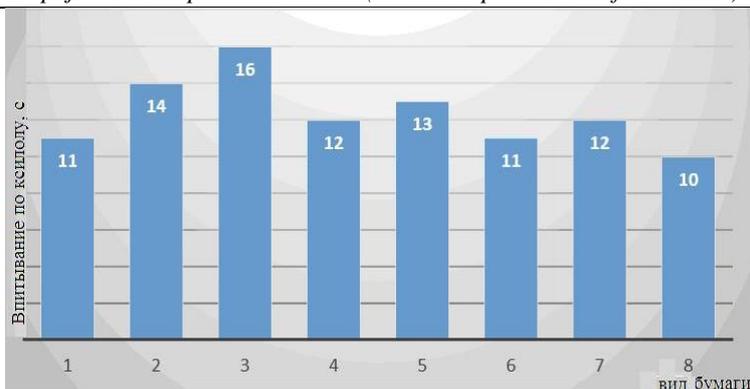


Рис. 4. Диаграмма изменения впитывающей способности по ксилолу от состава бумаги

Как видно из данных рис. 4 образцы экспериментальных бумаг имеют разное время впитывания ксилола. Впитывающая способность бумаги по отношению к печатной краске уменьшается с введением бумажную массу синтетических полимеров, (бумаги №2 и №3) за счет уменьшения пористости и размеров капилляров.

С другой стороны, на впитывание жидкости влияет не только размер пор, но и природа синтетического полимера. Пористость бумаги №4 содержащей ОН высокая, но впитывающая способность по ксилолу хуже, чем бумаги из чистой ХЦ. Видимо, оказывает влияние олиофильно-олиофобное взаимодействие молекул волокон и впитываемого вещества. Следует отметить, что наряду с красковосприятием существенной характеристикой печатных свойств бумаги является время закрепления краски на оттиске. Закрепление краски на бумаге обычно связывают с ее впитывающей способностью. Красковосприятие экспериментальной бумаги различается не только процентным соотношением в композиции ОН и ХЦ, но и определяется молекулярной и структурной природой бумаги.

Важным свойством бумаг является способность сохранять форму и **геометрические размеры в процессе деформации**. Упругие свойства бумаги проявляются после действий приложенной силы, вызывающей деформацию. Выпрямление волокон сдерживается силами связи между ними. Таким образом, деформация бумаги зависит не только от деформационных свойств волокон, но и от характера образованной ими структуры. При неоднородности структуры листа по влажности возникает необходимость ее последующей переработки [11-12].

В табл. 3 приводятся изменения линейных размеров экспериментальных образцов бумаг после намочения и высушивания. Определение линейной деформации экспериментальных композиций оценивали по ГОСТ 13525.19-71.

Приведенные данные свидетельствует о том, что с введением в бумажную композицию синтетических полимеров влага проникает в упорядоченные участки и не превышает допустимых норм, в машинном направлении деформация несущественна.

Таблица 3

Деформация бумаг после их увлажнения и высушивания

Виды бумаги, № п/п	Относительная деформация, %			
	После увлажнения		После высушивания	
	машинное	поперечное	машинное	поперечное
1	0,59	2,2	-0,79	-1,20
2	0,54	1,23	-0,75	-1,23
3	0,52	1,12	-0,64	-1,19
4	0,59	1,8	-0,99	-1,28
5	1,24	0,96	-1,12	-1,19
6	0,74	1,7	-0,99	-1,08
7	0,39	1,5	-0,60	-1,70
8	0,63	1,4	-0,56	-1,65

Деформационные свойства экспериментальной бумаги при сжатии-возрастающей нагрузке. В процессах полиграфического производства деформационные свойства бумаги имеют большое значение, как для нормального протекания различных технологических процессов, так и для эксплуатационных характеристик готовых изделий [13].

Однако, при увеличении давления возрастает вероятность растискивания краски, что вызывает

искажения градационных и цветовых характеристик оттисков. На рис. 5.5 приведена зависимость относительной деформации под напряжением сжатия $5 \cdot 10^5$ н/м² от вида бумаги. Полученные зависимости согласуются с данными по пористости бумаг. При добавлении ОН возрастает пористость, соответственно увеличивается величина относительной деформации при сжатии.

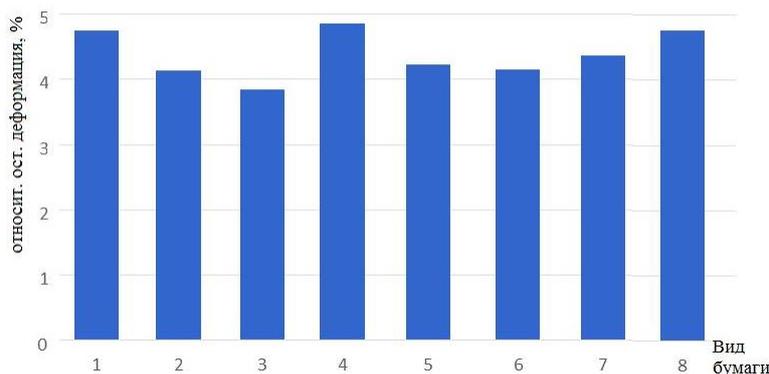


Рис. 5. Диаграмма относительной деформации при сжатии от состава бумаги.
Напряжение сжатия $P=5 \cdot 10^5$ н/м²

Использование полимерных проклеивающих веществ уменьшает пористость на 38% и относительную деформацию при сжатии на 15%. Наличие химически совмещаемых функциональных групп в составе использованных полимеров, как с целлюлозой, так и с ОН способствует появлению новых межмолекулярных связей, лучшему переплетению разнородных волокон и уплотнению структуры бумаги в целом.

Заключение. Синтетические полимеры адсорбируются в виде полидисперсных частиц на поверхности волокон, что способствует уменьшению пор на поверхности бумаги (на 30-45%). За счет уменьшения пористости впитывающая способность бумаги по отношению к печатной краске нормализуется, одновременно уменьшается относительная деформация ($5 \cdot 10^5$ н/м²) бумаги.

Установлено, что бумага, полученная с применением АЭ или ПАПЭТФ отличается повышенной белизной (на 6%) и гладкостью (на 21%). С увеличением кристалличности и однородности улучшаются физико-механические свойства бумаги (на 15-20%). Белизна и гладкость положительно влияют на цветовые характеристики, оптическую плотность оттиска, красковосприятие.

Впитывающая способность бумаги по отношению к печатной краске уменьшается с введением в бумажную массу синтетических полимеров за счет уменьшения пористости и размеров капилляров. Красковосприятие бумаги различается не только соотношением в композиции ОН и ХЦ, но и определяется молекулярной и структурной природой бумаги.

Наличие химически совмещаемых функциональных групп в составе использованных полимеров, как с целлюлозой, так и с синтетическими волокнами способствует появлению новых межмолекулярных связей, лучшему переплетению разнородных волокон и уплотнению структуры бумаги в целом.

Литературы:

1. Исследование рынка бумаги. Электронный ресурс. / <http://www.vniki.ru/>
2. <http://www.podrobno.uz>.
3. Ешбаева У.Ж., Рафиков А.С. Бумага из альтернативного и вторичного сырья. Монография. – Ташкент: Tafakkur gulshoni. 2015.-112 с.
4. Тиллашайхов М.С., Сайфутдинов Р. Миркамилов Ш.М. Изменение структуры стеблей хлопчатника в процессах его переработки на целлюлозу // Тез. докл.Респ.конф.молодых учен, и спец. – Ташкент. 1988.– С.85
5. Анохин.А.П. Бессернистые методы выделения целлюлозы из стеблей хлопчатника и возможности ее использования: Автореф. на соис. уч. степ. канд. тех. наук. – Ташкент. 1984. –16 с
6. Гутман Б. Б., Янченко Л. Н., Гуревич Л. И., Бумага из синтетических волокон. – Москва. МГУП, 1971. –128 с.
7. Варепо, Л.Г., Голунов, А.В. Влияние геометрии поверхности бумаги на цветопередачу оттиска // Advanced Materials Research. – М. 2011.–Р. 366–369.
8. Кулак М.И., Медяк Д.М. Взаимосвязь структуры и оптических свойств бумаги // Актуальные проблемы прочности. Матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Витебск: ВГТУ, 2004. - С. 184 - 189.
9. Остреров М.А., Товстошкурова Д.У., Окунева Т.К. Методы оценки качества печатных видов бумаги по ГОСТ и ISO. // Целлюлоза. Бумага. Картон. – Москва, 1994. № 3-4. –С. 20-22.
10. Климова Е.Д., Азарова И.Н. Материаловедение–Москва. МИПК им. И.Федорова.2006.–304с.
11. Комаров. В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. – Архангельск, 2002. - 440 с.
12. Ешбаева У.Ж., Рафиков А.С. Микроструктурные свойства бумаг с введением химических полимеров // Полиграфия. – Москва, 2016. – №2. – С.44–46.
13. Хюн Ю.А. Разработка методики тестирования упаковочного картона применительно к различным условиям печатного процесса: Дисс.на соис. уч. степ. канд.тех.наук. – Москва. МГУП. 2005. –120 с.

Романов В.В.

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» СамГТУ

Животягин Д.А.

аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» СамГТУ

Зимин Л.С.

доктор технических наук, профессор, СамГТУ, г. Самара

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «НАГРЕВ-ДЕФОРМАЦИЯ» ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

Аннотация: В данной статье рассматривается проблема определения скрытых, не видимых дефектов в начальной стадии развития, которые могут привести к отказам в электротехнологических установках в процессе эксплуатации. Выявление подобных дефектов подразумевает применение метода, основанного на использовании электронно-оптических устройств для регистрации и измерения излучения с последующим сопоставлением его с температурой поверхностей и окружающей среды. В статье кратко описываются факторы, которые могут оказать влияние на работу термографических регистраторов (тепловизоров) и в конечном итоге привести к ошибочным результатам. Разработаны решения по обнаружению и устранению проблем.

Экспериментальное термографическое обследование проводилось на индукционных нагревателях марки ИН-1100, ИН-800. Приведены краткие характеристики исследуемых электротехнологических установок.

Основой эффективной работы современных металлургических производств является стабильность работы электротехнологических установок, так как на качество выпускаемой продукции оказывают влияние именно они.

Отказы электротехнологических систем являются наиболее существенной составляющей в общей статистике отказов оборудования и связаны в основном с нагревом самих установок, вспомогательного оборудования, контактных соединений сверх допустимых норм [1].

При эксплуатации имеющего скрытые дефекты или неисправного электротехнологического оборудования, вспомогательного оборудования, питающих его линий неизбежно возникают потери электрической энергии, которые в конечном счете выделяются в виде тепла. Теплота повышает температуру контактных соединений, обмоток, конструктивных деталей, что при интенсивном нагреве может привести к самовоспламенению электротехнологических установок и одновременно рассеивается в окружающую среду. Так же, нагрев оборудования является главной причиной старения изоляции и выхода оборудования из строя и значительно ограничивает его мощность.

В соответствии ГОСТ 8865-70 [4], температура должна выдерживаться в пределах, соответствующих данному классу изоляции, тогда обеспечивается нормальный срок службы оборудования, от 15 до 25 лет. Сокращают нормальные сроки службы форсированные режимы, а систематические недогрузки, наоборот, приводят к недоиспользованию материалов, оборудование морально устаревают и возникает необходимость в его замене раньше, чем износится изоляция. Таким образом, экономически нецелесообразны как слишком малые, так и большие сроки службы [2].

Для вычисления температуры поверхности обследуемых конструкций и оборудования инфракрасная термография использует электронно-оптические устройства для измерения потока излучения, на основании которого

Для персонала, проводящего термографическое обследование (термографиста), чрезвычайно важно учитывать пределы возможностей оборудования, а также влияние различных внешних факторов. В комплексе это позволяет более точно выявлять и анализировать возможные проблемы [3].

При помощи тепловизора, марки ThermaCAM65, с актуальным сроком поверки, производилось термографическое обследование индукционных нагревателей ИН-800 и ИН-1100. В таблице №1, приведены краткие характеристики обследуемых установок

Таблица №1

Технические характеристики индукционных нагревателей ИН-800, ИН-1100

№	Характеристика	Ед.изм.	ИН-1100	ИН-800
1	Производительность	т/час	12	9
2	КПД		0,6	0,62
3	Температура нагрева заготовок	°С	550	550
4	Время нагрева слитков	мин	75-450	40-240
5	Диаметр нагреваемых слитков	мм	630,780,935,1075	480,630
6	Длина нагреваемых слитков	мм	700-1850	700-1850
7	Количество одновременно нагреваемых слитков	шт	3-8	3-8
8	Длина индукционного нагревателя	мм	6746	6746

Термографическая проверка выполнялась в комплексе, на всем оборудовании и при обнаружении проблемных мест они обследовались локально. Для достоверного определения отклонений оборудование должно быть нагружено не менее чем на 50% от номинальной мощности, в нашем случае нагреватели были нагружены на 75%. Так же для получения достоверной информации все работы по тепловизионной диагностике проводились при отсутствии прямых солнечных лучей и других источников инфракрасного излучения. При проведении тепловизионной съемки, учитывалось влияние внешних факторов, которые могут повлиять на достоверность результатов, например, наличие близко расположенного искусственного освещения

либо другого, более теплого оборудования. Для обеспечения максимально полной видимости объекта, обследование, осуществлялась с 3-х точек. Так же был учтен коэффициент излучения исследуемой поверхности. К примеру, блестящие поверхности на термограмме могут выглядеть теплее, чем это есть на самом деле. Для достоверности было проведено сравнение температур разных областей одного оборудования.

На данных рисунках обозначена лишь небольшая часть аварийных дефектов, а также дефектов, которые по истечении определенного времени могли стать причиной аварийного отключения оборудования, находились в начальной стадии развития.

Дефекты по индукционному нагревателю ИН-1100

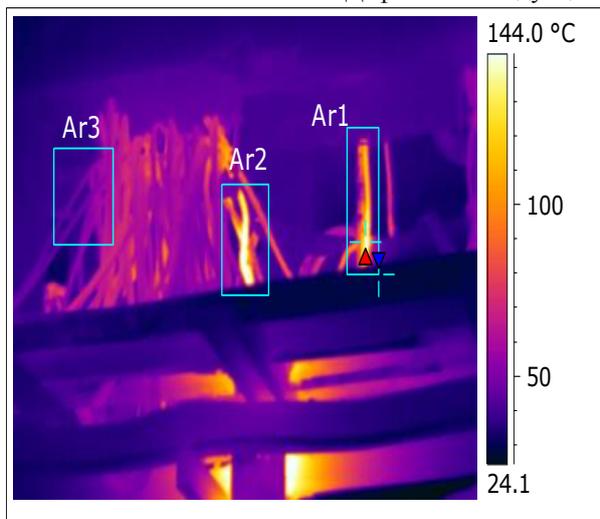


Рисунок 1. Нагрев питающей кабельной линии до 144°C

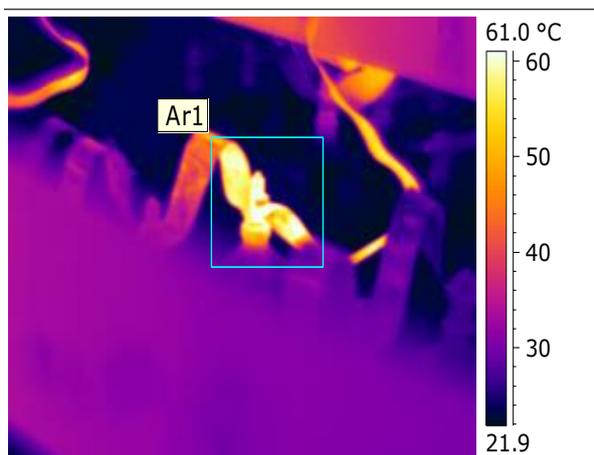


Рисунок 2 Нагрев вывода конденсатора до 61°C

Дефекты по индукционному нагревателю ИН-800

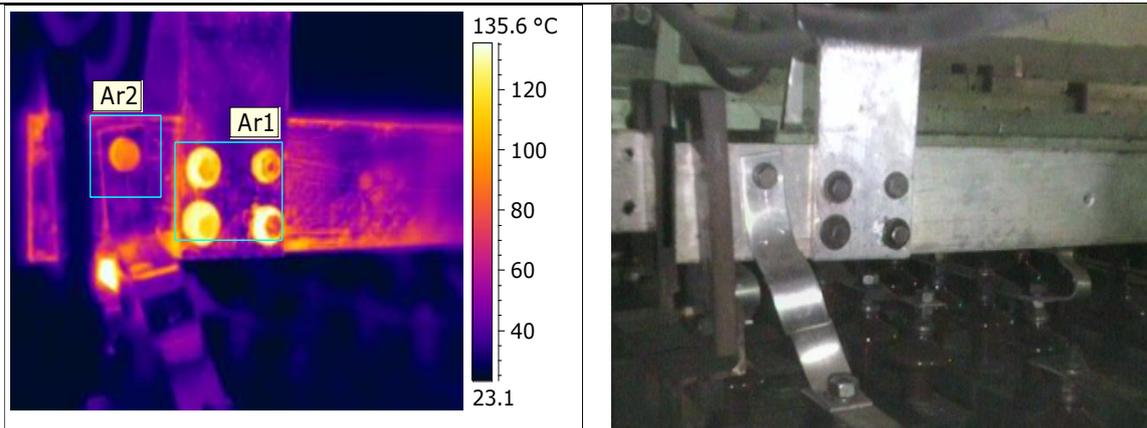


Рисунок 3 Нагрев болтового соединения шин до 135⁰С

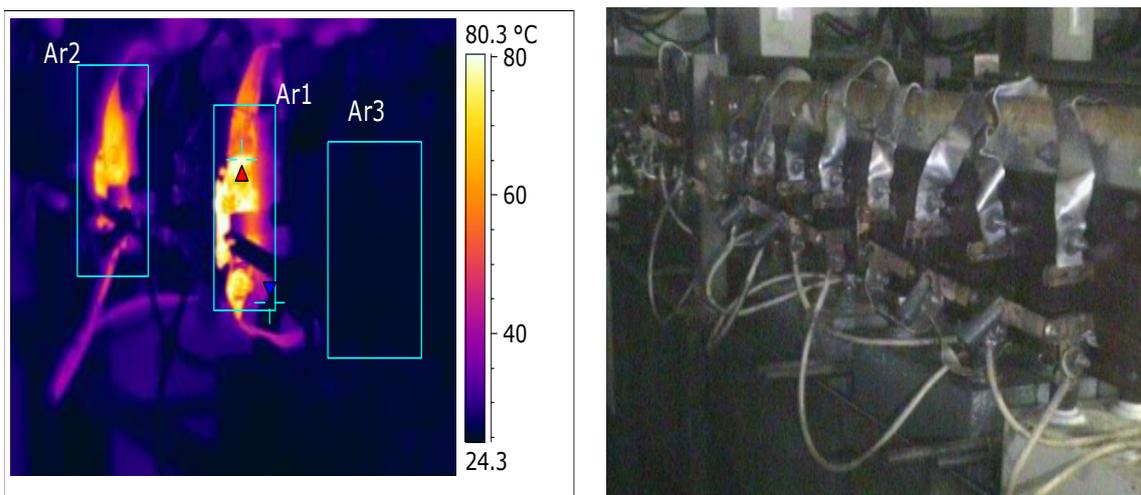


Рисунок 4 Нагрев ножей разъединителя до 80⁰С

Проведение термографической съемки позволило нам определить, как критические дефекты (рисунок 3, рисунок 1), так и дефекты в начальной стадии развития (рисунок 4, рисунок 2), вовремя грамотно организованные мероприятия по устранению, исключили аварийные отключения и простои оборудования. Как следствие, брак, зависящий от

непреднамеренного отключения оборудования, отсутствовал.

Ниже, на рисунке №5, в графическом виде приведена статистика суммарных аварийных отключений индукционных нагревателей ИН-800, ИН-1100 с 2012г. по 2017 г.

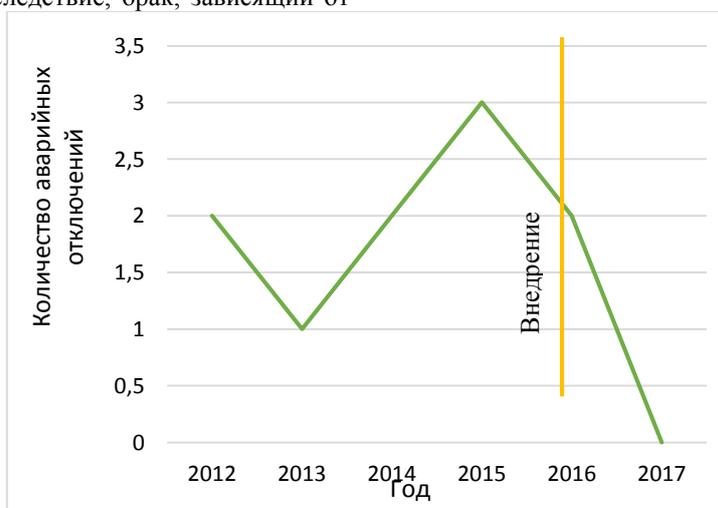


Рисунок 5. Динамика аварийных отключений индукционных нагревателей ИН-1100 и ИН-800 в период с 2012 по 2017 года

Для устранения обнаруженных дефектов были проведены следующие мероприятия:

- разбалчивание и зачистка болтовых соединений;
- смазка контактной части специальной смазкой «Суперконт» и «Экстраконт»;
- сборка контактных болтовых соединений и затяжка болтов динамометрическим ключом в соответствии с ГОСТ 10434-82[5];
- замена кабельной линии на линию большим сечением.
- зачистка контактных частей разъединителей, смазка вышеуказанными специальными смазками, замена прижимных колец и пружин;

Из полученных результатов видно, что применение инфракрасной термографической дефектоскопии на электротехнологических установках промышленных предприятий имеет целый ряд положительных качеств, достоверно выявляет проблемные

места и позволяет вовремя устранить как аварийные дефекты, так и дефекты в начальной стадии развития.

Библиографический список:

[1] Лозинский М.Г. Промышленное применение индукционного нагрева. /М.Г. Лозинский; М.: Издательство АН СССР, 1948. 471с.

[2] Бажанов С.А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации / С.А. Бажанов НТФ "Энергопрогресс", Москва, 2005. 80с.

[3] РД 153-34.0-20.363-99. Методика инфракрасной диагностики электрооборудования и высоковольтных линий. 2000.

[4] ГОСТ 8865-70 Материалы электроизоляционные для электрических машин, трансформаторов и аппаратов. Классификация по нагревостойкости.

[5] ГОСТ 10434-82 Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования.

#5 (45), 2019 część 1
Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe
(Warszawa, Polska)
Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

Zespół redakcyjny

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

Rada naukowa

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

Dawid Kowalik (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Peter Clarkwood (University College London)

#5 (45), 2019 part 1
East European Scientific Journal
(Warsaw, Poland)
The journal is registered and published in Poland. The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

Editorial

Editor in chief - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

The scientific council

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

Dawid Kowalik (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Peter Clarkwood (University College London)

Igor Dzedzic (Polska Akademia Nauk)
Alexander Klimek (Polska Akademia Nauk)
Alexander Rogowski (Uniwersytet Jagielloński)
Kehan Schreiner(Hebrew University)
Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
Mikołaj Żukowski (Uniwersytet Warszawski)
Mateusz Marszałek (Uniwersytet Jagielloński)
Szymon Matysiak (Polska Akademia Nauk)
Michał Niewiadomski (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Redaktor naczelny - Adam Barczuk

1000 kopii.

Wydrukowano w «Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warszawa, Polska»

Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe

Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001
Warszawa, Polska

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

Igor Dzedzic (Polska Akademia Nauk)
Alexander Klimek (Polska Akademia Nauk)
Alexander Rogowski (Uniwersytet Jagielloński)
Kehan Schreiner(Hebrew University)
Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
Mikołaj Żukowski (Uniwersytet Warszawski)
Mateusz Marszałek (Uniwersytet Jagielloński)
Szymon Matysiak (Polska Akademia Nauk)
Michał Niewiadomski (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Editor in chief - Adam Barczuk

1000 copies.

Printed in the "Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Poland»

East European Scientific Journal

Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Poland

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com>