



#2 (42), 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 Michałak (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)

#2 (42), 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 Michałak (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

Пятаков Э.Н. ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИТУАЦИИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ СУДОВ.....	4
Ворохобин И.И. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНЫХ КООРДИНАТ СУДНА.....	10
Боровик Ю. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИОННЫХ РЕАКТОРОВ.	17
Еланский А.Ю., Титоренко К.В., Лабунский Л.С. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА	18
Ерошенко В.Д., Овчинников А.Н., Ефименко А.А., Белянкина Л.М. МОДИФИКАЦИИ РЕЗОЛЬНОЙ ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ СОЛЯМИ МЕДИ ПРИМЕНЯЕМОЙ В КАЧЕСТВЕ СВЯЗУЮЩЕГО	21
Куприянов В.В. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ПРОГНОЗОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ С ОБОРУДОВАНИЕМ В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ	25
Мозговий А.О. УЗАГАЛЬНЕНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ НА ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	31
Тяпин А.А., Кинев Е.С. ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НЕСИММЕТРИИ МГД-МАШИНЫ.....	40

ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Сагайдак-Нікітюк Р.В., Гаркуша М.І., Демченко Н.В. МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СОЦІАЛЬНО-ПСИХОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАХІВЦІВ ФАРМАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЙОГО ПРОФЕСІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ	48
--	----

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Гилязов Е.Г., Аронова А.А., Изгалиев С.А., Байшаханова А.А. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО ЭФИРА И ЭТИНИЛЦИКЛОГЕКСАНОЛА НА ПОВЫШЕНИЕ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА ПРЯМОГОННОГО БЕНЗИНА	54
--	----

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Pyatakov E.N.

PhD, associate professor,
National University «Odessa Maritime Academy»

FORMALIZATION OF SITUATION OF DANGEROUS RAPPROCHEMENT OF VESSELS

Пятаков Эдуард Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
Национальный университет "Одесская морская академия"

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИТУАЦИИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ СУДОВ

Summary. Formalization of situation of dangerous rapprochement of vessels is produced. Formulas for the calculation of parameters of relative motion of vessels depending on the parameters of their veritable motion are resulted.

Analytical expressions for the calculation of values of time and distance of the shortest rapprochement of pair of vessels are got. The condition of rapprochement of vessels depending on the parameters of situation of their rapprochement is got.

Аннотация. Произведена формализация ситуации опасного сближения судов. Приведены формулы для расчета параметров относительного движения судов в зависимости от параметров их истинного движения.

Получены аналитические выражения для расчета значений времени и дистанции кратчайшего сближения пары судов. Формализовано условие сближения судов в зависимости от параметров ситуации их сближения.

Keywords: safety of navigator, divergence of vessels, situation of dangerous rapprochement, parameters of the shortest rapprochement of vessels.

Ключевые слова: безопасность судовождения, расхождение судов, ситуация опасного сближения, параметры кратчайшего сближения судов.

Постановка проблемы.

Снижение аварийности судов при плавании в стесненных водах является одной из важнейших проблем повышения безопасности судовождения.

В условиях быстротекущего изменения навигационной обстановки при плавании судна в стесненных водах судоводитель должен располагать оперативными методами оценки опасности сближения судов для своевременного предупреждения возможного столкновения. Поэтому разработка процедуры оценки опасности сближения судов, чему посвящена данная статья, является актуальным и перспективным научным направлением.

Анализ последних достижений и публикаций.

Вопросы предупреждения столкновений судов рассмотрены в многих работах современных ученых. В работе [1] приведено подробное исследование методов локально-независимого управления и разработан метод формирования гибких стратегий расхождения, а принцип внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов рассмотрены в работе [2], в которой также приведен анализ методов их реализации.

В монографии [3] приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов предложена в работе [4], а в работе [5] рассмотрено взаимодействие судов в ситуации опасного сближения и выбор стратегии расхождения для предупреждения их столкновения. Стратегия управления

тремя судами для безопасного расхождения предложена в работе [6], а в публикации [7] для уклонения от столкновения предложен новый фуззи-метод. В работе [8] показано, что используя аналитическую модель морской системы GIS может быть получено точное прогнозирование времени столкновения и позиции. Предложенный метод дает оператору СУДС возможность принятия решений по предупреждению столкновения судов.

В работе [9] рассматривается и обсуждается метод оценки риска столкновения с использованием режима истинного движения. В ней вводятся линия прогнозируемого столкновения (LOPC) и зона препятствий по цели (OZT) для оценки риска столкновения, эти значения связаны с истинным движением, и это дает возможность выявить ситуации опасного сближения и обеспечить безопасное плавание в стесненных водах. В работе [10] излагается теоретическое обоснование автономной судовой системы уклонения от столкновения СА. Отмечается, что исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены классическим подходом, основанным на математических моделях и алгоритмах, или компьютерной технологией, использующей искусственный интеллект.

Особенности внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов рассмотрены в работе [2], для реализации которого используются области опасных курсов и опасных скоростей пары судов.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.

Для получения аналитических выражений алгоритмов выбора безопасной стратегии расхождения опасно сближающихся судов необходимо проинформировать формализацию ситуации их сближения,

позволяющую по ее параметрам оценить возможность возникновения столкновения судов.

Цель статьи.

Целью статьи является формализация ситуации сближения двух судов для оценки опасности их возможного столкновения.

Изложение основного материала.

Параметрами ситуации сближения судов являются их относительная позиция, которая выражается пеленгом α_{ij} и дистанцией l_{ij} , а также параметры движения судов V_i, K_i, V_j, K_j . Угроза столкновения возникает, когда суда сближаются и прогнозируемая дистанция кратчайшего сближения $\min l_{ij}$ меньше предельно-допустимой дистанции. Найдем выражение для $\min l_{ij}$, предварительно приведя формулы для определения относительного курса K_{ot} и скорости V_{ot} судов из работы [2]:

$$K_{ot} = \begin{cases} \psi, \text{ при } V_{otx} > 0, V_{oty} > 0, \\ \pi + \psi, \text{ при } V_{oty} < 0, \\ 2\pi + \psi, \text{ при } V_{otx} < 0, V_{oty} > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$V_{ot} = [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(K_i - K_j)]^{1/2},$$

где $\psi = \arcsin[(V_i \sin K_i - V_j \sin K_j)/V_{ot}]$;

$$\begin{aligned} V_{otx} &= V_i \sin K_i - V_j \sin K_j; \\ V_{oty} &= V_i \cos K_i - V_j \cos K_j. \end{aligned}$$

Для вывода аналитического выражения дистанции кратчайшего сближения $\min l_{ij}$ найдем первую производную текущей дистанции l_{ij} по времени t , т.е. $\frac{\partial l_{ij}}{\partial t}$, учитывая, что выражение для l_{ij} имеет следующий вид:

$$l_{ij} = \sqrt{(\xi_i - \xi_j)^2 + (\eta_i - \eta_j)^2}.$$

где ξ_i, η_i и ξ_j, η_j - соответственно координаты i -го и j -го судов.

Следовательно, можно записать:

$$\frac{\partial l_{ij}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [\sqrt{(\xi_i - \xi_j)^2 + (\eta_i - \eta_j)^2}].$$

Дифференцируя и учитывая, что $\dot{\xi}_i = V_i \sin K_i, \dot{\eta}_i = V_i \cos K_i, \xi_{ij} = \xi_i - \xi_j$ и $\eta_{ij} = \eta_i - \eta_j$, получим:

$$\dot{l}_{ij} = \frac{\xi_{ij} (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) + \eta_{ij} (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j)}{l_{ij}}. \quad (2)$$

Приравняв первую производную к нулю, получим:

$$\xi_{ij} (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) + \eta_{ij} (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j) = 0.$$

Текущие значения разностных координат ξ_{ij} и η_{ij} определяются формулами:

$$\xi_{ij} = \xi_{ij0} - \int_0^t (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) d\tau$$

$$\eta_{ij} = \eta_{ij0} - \int_0^t (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j) d\tau.$$

Подставляя полученные формулы в предыдущее уравнение, найдем выражение для расчета величины mint_{ij} :

$$\begin{aligned} & \left[\xi_{ij0} - \int_0^{\text{mint}_{ij}} (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) d\tau \right] (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) = \\ & = - \left[\eta_{ij0} - \int_0^{\text{mint}_{ij}} (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j) d\tau \right] (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j). \end{aligned} \quad (3)$$

В случае прогнозирования, учитывая, что суда реализуют в программных траекториях движения участки локсодромии с постоянной скоростью, можно предположить, что на участке локсодромии значения параметров движения судов неизменны. Если есть основания предположить, что за интервал прогноза реализуется несколько участков программной траектории, то для прогноза корректным будет допущение о безынерционном движении судов с неизменными параметрами движения.

Рассмотрим случай, когда обоими судами реализуется только один участок траектории движения с известными и неизменными параметрами движения V_i, K_i, V_j, K_j . В этом случае уравнение (3) можно записать в следующем, удобном для поиска mint_{ij} , виде:

$$\begin{aligned} & [\xi_{ij0} - (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) \text{mint}_{ij}] (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) = \\ & = - [\eta_{ij0} - (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j) \text{mint}_{ij}] (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j). \end{aligned}$$

После алгебраических преобразований получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} & \text{mint}_{ij} [(V_i \sin K_i - V_j \sin K_j)^2 + (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j)^2] = \\ & = \xi_{ij0} (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) + \eta_{ij0} (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j). \end{aligned}$$

Обращаем внимание на справедливость следующего соотношения:

$$\begin{aligned} & (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j)^2 + (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j)^2 = \\ & = V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(K_i - K_j) = V_{otij}^2; \end{aligned}$$

т.е. множителем перед mint_{ij} является квадрат относительной скорости.

Следовательно, можно записать:

$$\text{mint}_{ij} = \frac{1}{V_{otij}} \left[\xi_{ij0} \frac{(V_i \sin K_i - V_j \sin K_j)}{V_{otij}} + \eta_{ij0} \frac{(V_i \cos K_i - V_j \cos K_j)}{V_{otij}} \right].$$

Согласно выражению (1), справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} & \frac{(V_i \sin K_i - V_j \sin K_j)}{V_{otij}} = \sin K_{otij}; \\ & \frac{(V_i \cos K_i - V_j \cos K_j)}{V_{otij}} = \cos K_{otij}, \end{aligned}$$

а также справедливы соотношения:

$$\xi_{ij0} = l_{ij0} \sin \alpha_{ij0} ; \eta_{ij0} = l_{ij0} \cos \alpha_{ij0} .$$

В этих выражениях l_{ij0} и α_{ij0} - начальные значения дистанции и пеленга. С учетом приведенных соотношений получим аналитическую зависимость,

содержащую $\min t_{ij}$:

$$\min t_{ij} = \frac{1}{V_{otij}} [l_{ij0} \sin \alpha_{ij0} \sin K_{otij} + l_{ij0} \cos \alpha_{ij0} \cos K_{otij}] ,$$

или окончательно через параметры относительного движения:

$$\min t_{ij} = \frac{l_{ij0} \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0})}{V_{otij}} . \quad (4)$$

Найдем выражение для расчета минимальной дистанции $\min l_{ij}$. Для этого вначале необходимо найти значения разностных координат ξ_{ij} и η_{ij} на момент времени $\min t_{ij}$:

$$\begin{aligned} \xi_{ij}(\min t_{ij}) &= \xi_{ij0} - (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) \min t_{ij} ; \\ \eta_{ij}(\min t_{ij}) &= \eta_{ij0} - (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j) \min t_{ij} . \end{aligned}$$

Подставим полученное выражение (4) для $\min t_{ij}$:

$$\begin{aligned} \xi_{ij}(\min t_{ij}) &= \xi_{ij0} - (V_i \sin K_i - V_j \sin K_j) \frac{l_{ij0} \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0})}{V_{otij}} , \\ \eta_{ij}(\min t_{ij}) &= \eta_{ij0} - (V_i \cos K_i - V_j \cos K_j) \frac{l_{ij0} \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0})}{V_{otij}} . \end{aligned}$$

Учитывая ранее полученное выражение, записываем:

$$\begin{aligned} \xi_{ij}(\min t_{ij}) &= l_{ij0} \sin \alpha_{ij0} - l_{ij0} \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \sin K_{otij} ; \\ \eta_{ij}(\min t_{ij}) &= l_{ij0} \cos \alpha_{ij0} - l_{ij0} \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \cos K_{otij} . \end{aligned}$$

Найдем квадраты разностных координат:

$$\begin{aligned} \xi_{ij}^2(\min t_{ij}) &= l_{ij0}^2 [\sin \alpha_{ij0} - \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \sin K_{otij}]^2 ; \\ \eta_{ij}^2(\min t_{ij}) &= l_{ij0}^2 [\cos \alpha_{ij0} - \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \cos K_{otij}]^2 , \end{aligned}$$

откуда следует:

$$\begin{aligned} (\min l_{ij})^2 &= \xi_{ij}^2(\min t_{ij}) + \eta_{ij}^2(\min t_{ij}) = l_{ij0}^2 [\sin^2 \alpha_{ij0} + \cos^2 \alpha_{ij0} + \cos^2(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \sin^2 K_{otij} + \\ &+ \cos^2(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \cos^2 K_{otij} - 2 \sin \alpha_{ij0} \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \sin K_{otij} - \\ &- 2 \cos \alpha_{ij0} \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \cos K_{otij}] , \end{aligned}$$

или после группировки членов:

$$\begin{aligned} (\min l_{ij})^2 &= l_{ij0}^2 [1 + \cos^2(K_{otij} - \alpha_{ij0}) (\sin^2 K_{otij} + \cos^2 K_{otij}) - \\ &- 2 \cos \alpha_{ij0} \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0}) \cos K_{otij}] = l_{ij0}^2 [1 + \cos^2(K_{otij} - \alpha_{ij0}) (\sin^2 K_{otij} + \cos^2 K_{otij}) - \\ &- 2 \cos(K_{otij} - \alpha_{ij0}) (\sin \alpha_{ij0} \sin K_{otij} + \cos \alpha_{ij0} \cos K_{otij})] . \end{aligned}$$

Производим дальнейшие преобразования:

$$\begin{aligned} (\min l_{ij})^2 &= l_{ij0}^2 [1 + \cos^2(K_{otij} - \alpha_{ij0}) - 2\cos(K_{otij} - \alpha_{ij0})\cos(K_{otij} - \alpha_{ij0})] = \\ &= l_{ij0}^2 [1 - \cos^2(K_{otij} - \alpha_{ij0})] \end{aligned}$$

Следовательно, $(\min l_{ij})^2 = l_{ij0}^2 \sin^2(K_{otij} - \alpha_{ij0})$, откуда:

$$\min l_{ij} = l_{ij0} \sin(K_{otij} - \alpha_{ij0}). \quad (5)$$

Таким образом, с помощью выражений (4) и (5) производится расчет величин $\min t_{ij}$ и $\min l_{ij}$.

Для возникновения ситуации опасного сближения необходимо, чтобы суда сближались, т. е. $\dot{D} < 0$. Найдем выражение для $\dot{D}$ в зависимости от параметров ситуации сближения. Для этого рассмотрим рис. 1, учитывая, что в относительном движении неподвижным является судно C_2 . Поэтому из

рис. 1 следует:

$$\dot{D} = -V_{ot} \cos(\alpha - K_{ot}).$$

Обращаем внимание, что при сближении судов $\dot{D} < 0$, что справедливо при $0 \leq \alpha - K_{ot} < \pi/2$. Так как равенство $\alpha - K_{ot} = \pi/2$ имеет место в момент времени $t = T_{\min}$, то до момента времени $T_{\min}$ знак $\dot{D}$ является неизменным.

Полагая, что скорости судов V_1 и V_2 являются неизменными, рассмотрим зависимость скорости $\dot{D}$ от курсов судов K_1 и K_2 . Из последнего выражения получим:

$$\dot{D} = -V_{ot} [\cos K_{ot} \cos \alpha + \sin K_{ot} \sin \alpha] \quad (6)$$

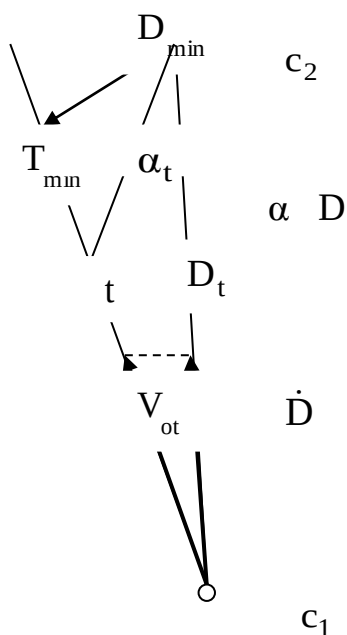


Рис. 1. Определение величины $\dot{D}$

Раньше получили выражения:

$$\sin K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_{ot}}, \cos K_{ot} = \frac{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2}{V_{ot}}.$$

С учетом этого выражение (6) принимает вид:

$$\dot{D} = -[(V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \cos \alpha + (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \sin \alpha].$$

Раскроем скобки и группируем:

$$\dot{D} = -[V_1 (\cos K_1 \cos \alpha + \sin K_1 \sin \alpha) - V_2 (\cos K_2 \cos \alpha + \sin K_2 \sin \alpha)], \text{ или}$$

$$\dot{D} = -[V_1 \cos(K_1 - \alpha) - V_2 \cos(K_2 - \alpha)].$$

Окончательно выражение для определения изменения дистанции $\dot{D}$ принимает вид:

$$\dot{D} = V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)$$

Выводы и предложения.

1. Приведены формулы для расчета параметров относительного движения судов в зависимости от параметров их истинного движения.
2. Получены аналитические выражения для оценки значений времени и дистанции кратчайшего сближения пары судов.
3. Формализовано условие сближения судов в зависимости от параметров ситуации их сближения.

Список литературы:

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. - 424 с.
2. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака, Э.Н. Пятаков, А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), - 2016. - 585 с.
3. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. - Одесса: Фенікс, 2013. - 180 с.
4. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. - 202 с.

5. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. - Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.

6. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов / И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. - 2014. - Вып. 20. Одесса: ОНМА. - С. 18 -23.

7. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der// J. Navig. 2007. 60, № 1, p. 17-31.

8. Hornauer S. Trajectory Planning with Negotiation for Maritime Collision Avoidance / Hornauer S., Hahn A., Blaich M., Reuter J. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, 2015, page 335-341.

9. Imazu H. Evaluation Method of Collision Risk by Using True Motion / Imazu H.// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2017, Vol. 11, No. 1, p. 65-70.

10. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.

APPLICATION OF MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD FOR ESTIMATION OF EFFECTIVE COORDINATES OF SHIP**Ворохобин Игорь Игоревич**кандидат технических наук, декан факультета МПнТ,
Национальный университет "Одесская морская академия"**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНЫХ КООРДИНАТ СУДНА**

Summary. The maximum likelihood method of calculation of coordinates of ship is considered for different laws of distributing of their errors. Analytical expressions of calculation of coordinates of ship are got, providing their maximal exactness.

The imitation design is conducted, the results of which confirmed correctness of analytical expressions of estimation of efficiency of the coordinates expected by a least-squares method at distributing of errors of lines of position on the mixed laws of both types.

Аннотация. Рассмотрен метод максимального правдоподобия расчета обсервованных координат судна для различных законов распределения их погрешностей. Получены аналитические выражения расчета обсервованных координат судна, обеспечивающие их максимальную точность.

Проведено имитационное моделирование, результаты которого подтвердили корректность аналитических выражений оценки эффективности обсервованных координат, рассчитанных методом наименьших квадратов при распределении погрешностей линий положения по смешанным законам обоих типов.

Keywords: navigation accident rate, least-squares method, maximum likelihood method, estimation of efficiency of coordinates.

Ключевые слова: навигационная аварийность, метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия, оценка эффективности обсервованных координат.

Постановка проблемы.

Обеспечение надлежащего уровня безопасности судовождения существенно зависит от точности контроля места судна при плавании в стесненных водах. Как показал анализ статистических материалов погрешностей навигационных измерений, в ряде случаев погрешности не подчиняются нормальному закону распределения и в случае избыточных измерений при расчете координат судна по методу наименьших квадратов происходит потеря их точности, чего можно избежать, применяя для расчета координат метод максимального правдоподобия.

Анализ последних достижений и публикаций.

Во многих работах отечественных и зарубежных ученых освещены вопросы повышения точности определения места судна. Результаты анализа статистических материалов точности определения места судна с помощью приёмника спутниковой радионавигационной системы представлены в работе [1], которые показали, что предположение о распределении случайных погрешностей определения широты и долготы по закону Гаусса не является корректным и требует альтернативного подхода.

В работах [2, 3] рассматриваются вопросы законов распределения вероятностей погрешностей навигационной измерений исходной выборки, которая является смесью частных выборок нормально распределённых погрешностей с разной дисперсией. Предложена процедура оценки эффективно-

сти обсервованных координат судна с учетом смешанных распределений погрешностей исходной выборки.

В работах [4, 5] представлен анализ статистических данных погрешностей навигационных измерений, полученных в натурных наблюдениях, который показал, что погрешности навигационных измерений не подчиняются нормальному закону распределения.

Анализ выборок случайных погрешностей измерений навигационных параметров произведен в работе [6] и показано, что наибольшее согласие статистического материала с теоретическим распределением достигается для законов, отличающихся от нормального закона.

В этом случае, как указано в работах [7, 8], применение метода наименьших квадратов для расчета обсервованных координат судна не обеспечивает возможности получения их эффективных оценок. Поэтому для получения эффективных оценок обсервованных координат судна следует использовать метод максимального правдоподобия, учитывающий действительный закон распределения погрешностей. Данное обстоятельство в настоящее время не учитывается, и соответствующие аналитические выражения получения эффективных оценок отсутствуют.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.

Как показывает анализ рассмотренных работ, при избыточных измерениях навигационных параметров расчет обсервованных координат следует

производить методом максимального правдоподобия с учетом закона распределения вероятностей случайных погрешностей измерения, чем достигается максимальная точность определяемых координат. При этом необходимо располагать алгоритмом расчета координат судна с учетом закона распределения вероятностей случайных погрешностей измерения навигационных параметров, формирование

которых является предметом исследования данной статьи.

Цель статьи.

Целью статьи является разработка аналитических выражений расчета координат судна при наличии избыточных измерений навигационных параметров методом максимального правдоподобия, который учитывает закон распределения вероятностей погрешностей навигационных измерений.

Изложение основного материала.

Основной мерой повышения точности определения обсервованных координат судна является использование избыточных линий положения [4], учет которых производится методом максимального правдоподобия. Как указывается в работе [9], система уравнений правдоподобия имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_i(\xi_i)}{f_i(\xi_i)} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_i(\xi_i)}{f_i(\xi_i)} = 0, \\ \xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i, \end{cases} \quad (1)$$

где α_i и r_i - соответственно направление и перенос i -й линии положения (ЛП); $f_i(\xi_i)$ - плотность распределения погрешности измерения ξ_i ;

n - число линий положения.

В случае нормального распределения погрешностей ЛП ξ_i выражения для поиска эффективных оценок приращения координат находим, учитывая аналитический вид плотности распределения:

$$f_i(\xi_i) = f(\xi_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{\xi_i^2}{2\sigma_i^2}\right).$$

Для составления уравнений правдоподобия (1) следует найти выражения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi_i} f_i(\xi_i) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[\exp\left(-\frac{\xi_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \right] = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{\xi_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \text{ и} \\ \frac{\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_i(\xi_i)}{f_i(\xi_i)} &= -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{\xi_i^2}{2\sigma_i^2}\right) / \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{\xi_i^2}{2\sigma_i^2}\right) = -\frac{\xi_i}{\sigma_i^2}. \end{aligned}$$

Поэтому (1) принимает вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} = 0, \end{cases}$$

$$\xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i.$$

С учетом последнего равенства приведенного выражения:

$$\begin{cases} X \sum_{i=1}^n \frac{\sin^2 \alpha_i}{\sigma_i^2} + Y \sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i \sin \alpha_i}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^n \frac{\sin \alpha_i}{\sigma_i^2} r_i = 0, \\ X \sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i \sin \alpha_i}{\sigma_i^2} + Y \sum_{i=1}^n \frac{\cos^2 \alpha_i}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i}{\sigma_i^2} r_i = 0, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \mathbf{AX} + \mathbf{BY} = \mathbf{C}, \\ \mathbf{BX} + \mathbf{DY} = \mathbf{E}, \end{cases}$$

где

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^n \frac{\sin^2 \alpha_i}{\sigma_i^2},$$

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i \sin \alpha_i}{\sigma_i^2},$$

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^n \frac{\sin \alpha_i}{\sigma_i^2} \mathbf{r}_i,$$

$$\mathbf{D} = \sum_{i=1}^n \frac{\cos^2 \alpha_i}{\sigma_i^2} \text{ и}$$

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i}{\sigma_i^2} \mathbf{r}_i$$

Решая последнюю систему уравнений, получим значения X и Y , являющиеся эффективными оценками приращений числимых координат,

т. е. $\Delta X_c = X$, $\Delta Y_c = Y$, причем:

$$\Delta X_c = \frac{\mathbf{CD} - \mathbf{BE}}{\mathbf{AD} - \mathbf{B}^2}, \quad \Delta Y_c = \frac{\mathbf{AE} - \mathbf{BC}}{\mathbf{AD} - \mathbf{B}^2}. \quad (2)$$

Для смешанных распределений первого и второго типа плотность распределения в общем виде можно записать следующим образом [9]:

$$f_s(\xi_i) = \frac{A_s}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)^{n+b}},$$

где A_s - нормирующий множитель;

$n+b$ и λ_i - соответственно существенный и масштабный параметры распределения.

Найдем выражения:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_s(\xi_i) = A_s \frac{\partial}{\partial \xi_i} \left[\frac{1}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)^{n+b}} \right] = -A_s (n+b) \xi_i \frac{1}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)^{n+b+1}}.$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \frac{\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_s(\xi_i)}{f_s(\xi_i)} &= -A_s (n+b) \xi_i \left[\frac{1}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)^{n+b+1}} \right] / A_s \left[\frac{1}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)^{n+b}} \right] = \\ &= -(n+b) \frac{\xi_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)}. \end{aligned}$$

Система уравнений правдоподобия для рассматриваемого случая принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i (n+b) \frac{\xi_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i (n+b) \frac{\xi_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)} = 0, \\ \xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим решение полученной нелинейной системы уравнений методом простой итерации [10]. Для этого в числителе первых двух уравнений (3) подставляем выражение для ξ_i , сокращая их на $(n + b)$:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{(X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i)}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{(X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i)}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)} = 0. \end{cases}$$

Первое уравнение можно записать в следующем виде:

$$X = \frac{[\sum_{i=1}^n \frac{\sin \alpha_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)} (r_i - Y \cos \alpha_i)]}{\sum_{i=1}^n \frac{\sin^2 \alpha_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)}}.$$

Получили уравнение, в левой части которого находится переменная X.

Аналогично, со второго уравнения системы (3) находим выражение для второй неизвестной переменной Y:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\cos \alpha_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)} (r_i - X \sin \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{\cos^2 \alpha_i}{(\xi_i^2 / 2 + \lambda_i)}}.$$

Полученные уравнения составляют систему нелинейных уравнений, которая решается методом простых итераций [10], причем в качестве начального приближения принимаются $X = X_0$ и $Y = Y_0$.

Рассмотрим применение метода максимального правдоподобия для расчета обсервованных координат судна при распределении погрешностей линий положения по обобщенному закону Пуассона. Для реализации метода максимального правдоподобия необходимо составить функцию правдоподобия, используя выражение для плотности [11]:

$$f(\xi) = \frac{B}{\sigma} \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2})],$$

где

$$B = \frac{\exp(-c)}{\sqrt{2\pi}}, \quad a_k = \frac{c^k}{k!} k^{-\frac{1}{2}}.$$

Для обобщенного Пуассоновского распределения выражение для $\frac{\partial}{\partial \xi} f(\xi) / f(\xi)$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\xi)}{\partial \xi} &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \frac{B}{\sigma} \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2})] \right\} = -\frac{B}{\sigma} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ a_k \left[\frac{\xi}{k\sigma^2} \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2}) \right] \right\} = \\ &= -\frac{B}{\sigma} \frac{\xi}{\sigma^2} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ a_k \left[\frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2}) \right] \right\} = -\frac{\xi}{\sigma^2} \frac{B}{\sigma} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ a_k \left[\frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2}) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Следовательно:

$$\frac{\frac{\partial}{\partial \xi} f(\xi)}{f(\xi)} = \frac{-\frac{\xi B}{\sigma^3} \sum_{k=1}^{\infty} \{a_k [\frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2})]\}}{\frac{B}{\sigma} \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2})]} = -\frac{\xi}{\sigma^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi^2}{2k\sigma^2})]}.$$

Система уравнений правдоподобия для рассматриваемого случая принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\xi_i}{\sigma_i^2} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} = 0, \end{cases}$$

$$\xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i.$$

Рассмотрим решение полученной нелинейной системы уравнений методом простой итерации. Первое уравнение можно записать в следующем виде:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} (r_i - Y \cos \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}}$$

Получили уравнение, в левой части которого находится искомая переменная X. Аналогично, со второго уравнения системы находим выражение для второй неизвестной переменной Y:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]} (r_i - X \sin \alpha_i)}{\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \frac{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \frac{1}{k} \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}{\sum_{k=1}^{\infty} [a_k \exp(-\frac{\xi_i^2}{2k\sigma_i^2})]}}.$$

Полученные уравнения составляют систему нелинейных уравнений, которая решается методом простых итераций, причем в качестве начального приближения принимаются $X = X_0$ и $Y = Y_0$.

Начальные значения переменных X и Y подставляются в третье уравнение, затем те же переменные и значения ξ_i подставляются в правые части первого и второго уравнений системы, в результате чего рассчитывают очередные приближения

искомых переменных, которые являются исходными для очередной итерации. Расчет обсервованных координат по избыточным линиям положения, погрешности которых подчиняются обобщенному закону Пуассона, с помощью предлагаемого алгоритма обеспечивает минимальную ковариационную матрицу векториальной погрешности.

Для оценки эффективности обсервованных координат, полученных при избыточных ЛП и рассчитанных методом наименьших квадратов проводилось имитационное компьютерное моделирование [9]. Причем рассматривались случаи, когда

погрешности линий положения подчинялись нормальному закону, а также смешанным законам первого и второго типа.

Имитационное моделирование проводилось по следующему алгоритму. Вначале по выбранному закону распределения генерировалась выборка погрешностей ЛП, состоящая из 1000 членов. Расчет координат каждой наблюдаемой точки производился по 8 линиям положения, причем элементы

ЛП (переносы Γ_i и направления градиентов α_i) задавались относительно истинного места судна. Поэтому переносы Γ_i линий положения равны их погрешностям ξ_i . При имитационном моделиро-

вании направления градиентов α_i выбирались равными $30^\circ, 75^\circ, 120^\circ, 165^\circ, 210^\circ, 255^\circ, 300^\circ$ и 345° . Используя сгенерированную выборку, можно получить 125 наблюдаемых точек, приращенные координат X и Y которых являются проекциями векториальной погрешности, позволяющим рассчитать ковариационную матрицу векториальной погрешности наблюдения. Формирование 125 наблюдаемых точек повторялось четыре раза, а их полученные координаты сохранялись, в результате чего накапливалась выборка S_{500} координат векториальной погрешности численностью 500 значений погрешности. С помощью полученной выборки рассчитывались математические ожидания M_X , M_Y и дисперсии D_X , D_Y проекций X и Y векториальной погрешности. Имитационной компьютерной программой предусмотрено графическое отображение положений наблюдаемых точек относительно математического ожидания, что позволяет произвести визуальную оценку их рассеяния. Учитывая, что векториальная погрешность определяется относительно истинного места судна, при имитационном моделировании для оценки эффективности наблюдаемых координат необходимо использовать не дисперсии проекций X и Y, а их вторые начальные моменты.

В компьютерной программе имитационного моделирования предусмотрен расчет наблюдаемых координат, как методом наименьших квадратов, так и методом максимального правдоподобия. При имитационном моделировании средне квадратическое отклонение ($\sqrt{\mu_2}$) погрешности линии положения принималась равным 5.

Вначале генерировалась выборка S_{500} для погрешностей ЛП, распределенных по нормальному закону, причем координаты наблюдаемых

точек рассчитывались методом наименьших квадратов. Для этого случая вторые начальные моменты составляющих векториальной погрешности оказались равными $a_{2xG}=24,48$ и $a_{2yG}=0,8617$, а второй начальный момент ее модуля $a_{2RG} = a_{2xG} + a_{2yG} = 25,86$.

Для оценки эффективности наблюдаемых координат судна рассчитанных методом наименьших квадратов, погрешности линий положения которых подчиняются смешанным распределениям, генерировались выборки погрешностей ЛП по смешанному закону, а затем рассчитывались наблюдаемые координаты методом наименьших квадратов и формировалась выборка $S_{500}^{МНК}$ координат векториальной погрешности. Одновременно по значениям тех же погрешностей производился расчет наблюдаемых координат методом максимального правдоподобия и формировалась выборка $S_{500}^{ММП}$ составляющих векториальной погрешности.

По данным выборкам производился расчет математических ожиданий, дисперсий и вторых начальных моментов $a_{2x}^{МНК}$, $a_{2y}^{МНК}$ и $a_{2x}^{ММП}$, $a_{2y}^{ММП}$ составляющих X и Y векториальной погрешности. Затем вычисляются значения вторых начальных моментов $a_{2R}^{МНК} = a_{2x}^{МНК} + a_{2y}^{МНК}$ и $a_{2R}^{ММП} = a_{2x}^{ММП} + a_{2y}^{ММП}$ полученные соответственно при использовании метода наименьших квадратов и метода максимального правдоподобия. Очевидно, при имитационном моделировании эффективность наблюдаемых координат e_{IM} , полученных методом наименьших квадратов, определяется отношением вторых начальных моментов $a_{2R}^{ММП}$ и $a_{2R}^{МНК}$, т.е. $e_{IM} = \frac{a_{2R}^{ММП}}{a_{2R}^{МНК}}$. Значения

эффективности e_{IM} сравниваются с соответствующими значениями эффективности e_T , рассчитанными теоретически по аналитическим выражениям, полученным в [9].

Сравнительная характеристика рассеяния наблюдаемых точек, координаты которых рассчитаны МНК и ММП, представлена на рис. 1.

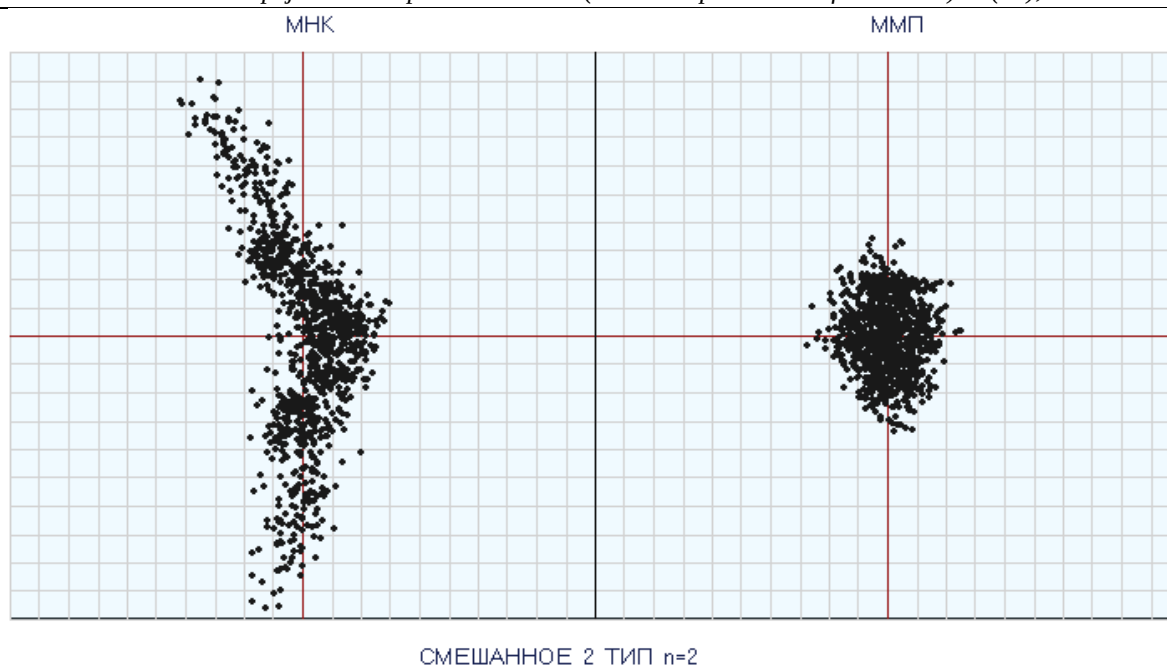


Рис. 1. Рассеяние наблюдаемых точек при $m=2$.

Таким образом, результаты имитационного моделирования подтвердили корректность аналитических выражений оценки эффективности наблюдаемых координат, рассчитанных методом наименьших квадратов при распределении погрешностей линий положения по смешанным законам обоих типов.

Выводы и предложения.

1. Рассмотрен метод максимального правдоподобия расчета наблюдаемых координат судна при наличии избыточных линий положения для различных законов распределения их погрешностей.
2. Получены аналитические выражения расчета наблюдаемых координат судна, обеспечивающие их максимальную точность.
3. Проведено имитационное моделирование, результаты которого подтвердили корректность аналитических выражений оценки эффективности наблюдаемых координат, рассчитанных методом наименьших квадратов при распределении погрешностей линий положения по смешанным законам обоих типов.

Список литературы:

1. Monteiro Luis. What is the accuracy of DGPS? / Sardinia Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris. // J. Navig. 2005. 58, № 2, p. 207-225.
2. Астайкин Д.В. Оценка точности позиции судна при наличии случайных погрешностей навигационных измерений / Астайкин Д.В. // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. - 2014. № 4. - С. 147-152.
3. Астайкин Д.В. Аналитическое выражение

функции распределения случайных величин смешанных законов/ Астайкин Д.В. // Водный транспорт. - 2014. №2 (20). - С. 6 – 11.

4. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. - 230с.

5. Hsu D. A. An analysis of error distribution in navigation / Hsu D. A. // The Journal of Navigation. - Vol. 32.- № 3. - P. 426 - 429.

6. Мельник Е.Ф. Приближенное описание смешанных распределений погрешностей навигационных измерений / Мельник Е.Ф. // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. - 2002. - Вып. 7.- Одесса: ОГМА. - С. 96 – 100.

7. Мудров В.М. Методы обработки измерений / Мудров В.М., Кушко В.Л. - М.: Советское радио, 1976. 192 с.

8. В.В. Степаненко. Эффективность оценки параметров ситуации опасного сближения судов/ В.В. Степаненко. // Судовождение: Сб. науч. трудов / ОГМА. - Вып. 2 – Одесса: Латстар, 2000. - С. 201 – 209.

9. Астайкин Д.В. Оценка точности координат судна при избыточных измерениях/ Астайкин Д.В., Сикирин В.Е., Вороховин И.И., Алексейчук Б.М. - Saarbrücken, Deutschland/Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. - 274 с.

10. Турчак Л. И. Основы численных методов/ Турчак Л. И. - М.: Наука. Гл. ред. физ. - мат. лит., 1987. - 320 с.

11. Сикирин В.Е. Описание навигационных погрешностей с помощью обобщенного распределения Пуассона/ Сикирин В.Е.// Судовождение: Сб. научн. трудов./ОНМА, Вып. 26. - Одесса: «Изд-тИнформ», 2016 - С. 152 – 156.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЕНСАЦИОННЫХ РЕАКТОРОВ.

Аннотация: В статье рассматриваются конструктивные особенности компенсационных реакторов. Приведены основные параметры и требования по надежности реактора РОМ – 270/35.

Ключевые слова: Компенсационный реактор, основные параметры, ОАПВ, отключенная фаза, ВЛ.

Введение

Однофазный масляный компенсационный реактор на класс напряжения 35 кВ, применяется для включения между нейтралью шунтирующих реакторов и землей. Компенсационный реактор обеспечивает ограничение тока подпитки в месте короткого замыкания в безтоковую паузу ОАПВ, а также разстройку резонансных процессов на отключенной фазе ВЛ в цикле ОАПВ. Компенсационный реактор эксплуатируется в условиях внешней установки на высоте над уровнем моря не больше 500 м, при температуре воздуха от -40 до +40 °С. Реактор выполнен без железного сердечника. Активная часть помещена в бак с трансформаторным маслом. Охлаждения реактора – естественное масляное. Обмотка реактора имеет отводы для изменения его индуктивности при снятом напряжении переключателем типа ПБВ[1,2]. Компенсационный реактор оборудован газовой защитой. Имеет устройство отбора проб газа из газового реле. Из высокой стороны компенсационного реактора обеспечены установления встроенных трансформаторов тока типа ТВТ 35 300/5, класс 10Р. Из низкой стороны компенсационного реактора установлены выносные трансформаторы тока типа ТФЗМ 10 300/5, класс 10Р. Реактор имеет встроенный датчик измерения температуры верхних слоев масла. Тележка реактора обеспечивает возможность его продольного и поперечного перемещения, ширина между каретками 1524 мм. Внутренние поверхности бака расширителя имеют маслостойкое покрытие, которые не влияют на масло. Реактор имеет устройство отбора проб масла из нижних частей бака. Во всем неопи-санном выше реактор отвечает требованиям ГОСТ 19470-74 (IEC600289).

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКТОРА РОМ-270/35

Запорожским трансформаторным заводом изготовлен и введенный в эксплуатацию на подстанции Западноукраинская компенсационный реактор РОМ – 270/35. Реактор отвечает наилучшим зарубежным аналогам, и имеет следующие технические характеристики.

Основные параметры:

Длительный ток в нормальном режиме работы $I_n=30A$.

Индуктивное сопротивление реактора при частоте 50 Гц: 300-4*30 Ом.

Добротность реактора на всех ступенях индуктивности не менее 20.

Линейный ввод реактора имеет класс изоляции 35 кВ.

Нейтраль реактора имеет класс изоляции выводов 10 кВ.

Реактор термически устойчивый при установившемся токе короткого замыкания, что имеет действующее значение $I_{кз}=280 A$ на протяжении 4 секунд, для двух следующих один за другим токовых влияний по 2 секунды каждый.

Общее количество влияний в год не более 30(60с).

Реактор является динамически устойчивым для единичного броска через него тока, имеющего амплитудное значение 750 А длительностью 0,02 секунды.

Главная изоляция компенсационного реактора, кроме влияний, что нормируются ГОСТ 1516-75 для заземляющих реакторов класса 35 кВ, выдерживает 60 кВ действующего значения напряжения в течении 4 секунд.

Поверхности, что поддаются коррозии, окрашено краской, стойкой к атмосферным воздействиям

Требования к заземлению реактора по ГОСТ 11677-85, ГОСТ 21130.

Материалы и устройства, что применяются при изготовлении реактора соответствуют требованиям существующих стандартов и ТУ.

Требования по надежности.

Назначенный срок эксплуатации – не менее 30 лет.

Необходимости ремонта с открыванием бака за назначенный срок эксплуатации – не требуется.

Вероятность безотказной работы за 8760 ч. не менее 0.99.

Гарантийный срок эксплуатации, не менее 36 месяцев.

Требования к маркировке. Реактор снабжен щитком по ГОСТ 11677-85, изготовленный из нержавеющей стали с стойким к коррозии, долговечными надписями.

На рис. 1. показан внешний вид компенсационного реактора РОМ-270/35.



ВЫВОДЫ

Реактор РОМ-270/35 соответствует требованиям существующих стандартов и ТУ. Реактор введен в эксплуатацию на подстанции Западноукраинская и успешно эксплуатируется.

Литература

1. Н.Н. Беляков, К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн и др.: «Процессы при однофазном автома-

тическом повторном включении линий высоких напряжений» – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 256с.

2. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Боровик Ю.М., Яндульский А.С.: Моделирование ОАПВ в линии электропередачи 750 кВ. - Problemy Electroenergetyki. Materiały III Międzynarodowego Seminarium (Łódź 10-11 czerwca 2002) - Łódź: Instytut Electroenergetyki. S. 57-66.

Elansky A.Y.

student,

Samara State University of Railway Transport

Titorenko K.V.

Student,

Samara State University of Railway Transport

Labunsky L.S.

Candidate of Engineering Sciences,

Associate Professor at the Department of Power Supply of Railways,

Samara State University of Railway Transport

PECULIARITIES OF CALCULATION OF METROPOLITEN TRAINING ELECTRICAL SYSTEM

Еланский Александр Юрьевич

студент,

Самарский Государственный Университет Путей Сообщения

Титоренко Ксения Викторовна

студент,

Самарский Государственный Университет Путей Сообщения

Лабунский Леонид Сергеевич

кандидат технических наук,

доцент кафедры электроснабжение железнодорожного транспорта,

Самарский Государственный Университет Путей Сообщения

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА

Summary: The theoretical aspects of calculations for the metro traction power supply system are investigated. The calculation of the traction currents of the subway was made using the program for the calculation of the traction power supply system of the main railways. Received a program for recalculating traction currents. Produced metering real. The accuracy of the proposed method is verified.

Аннотация: Исследованы теоретические аспекты расчетов системы тягового электроснабжения метрополитена. Произведен расчет тяговых токов метрополитена с помощью программы для расчета системы тягового электроснабжения магистральных железных дорог. Получена программа для пересчета тяговых токов. Произведен замер реальных тяговых токов. Проверена точность предложенного метода.

Key words: traction current, traction power supply system, metro, contact network, feeding feeder

Ключевые слова: тяговый ток, система тягового электроснабжения, метрополитен, контактная сеть, питающий фидер

Расчет и выбор основных параметров системы тягового электроснабжения (СТЭ) представляет собой сложную технико-экономическую задачу.

Основные параметры устройств СТЭ метрополитена зависят от величины и характера изменения тяговой нагрузки, применяемых схем питания тяговой сети, а также от наличия средств, повышающих качество электроэнергии. При этом основная сложность расчета обусловлена спецификой учета резкопеременной тяговой нагрузки [1, с. 3]. В настоящее время существуют программные средства для выполнения тяговых расчетов на ЭВМ. На железных дорогах широкое распространение получил программный комплекс для расчета систем тягового электроснабжения «КОРТАС». Но в стан-

дартных параметрах программы «КОРТАС» отсутствует пакет данных, определяющих напряжение в тяговой сети и тип подвижного состава метрополитена.

При анализе работы СТЭ Самарского метрополитена потребовалось выполнить тяговые расчёты для всей существующей линии. Для решения этой задачи в программном комплексе «КОРТАС» был создан профиль пути (рис. 1), выбран подвижной состав – электропоезд ЭД4 с массой состава 200 тонн (в Самарском метрополитене используется состав из 4 электровагонов 81–717/714 массой 34/33,5 т, при полной загрузке имеющей массу около 200 т). Расчёты проводятся для напряжения тяговой сети 3 кВ.

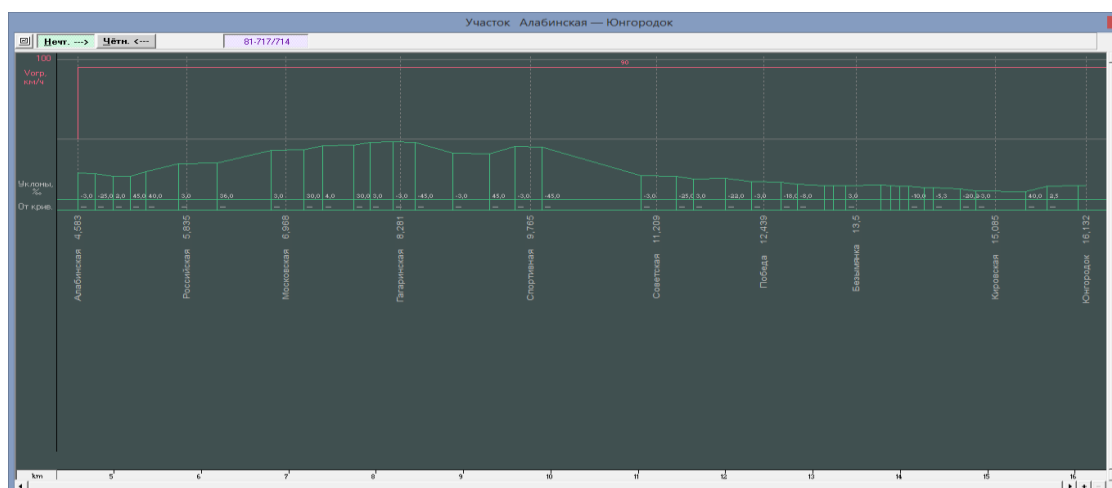


Рисунок 1. Профиль пути Самарского метрополитена

Результаты расчёта представлены на рис. 2 и 3.

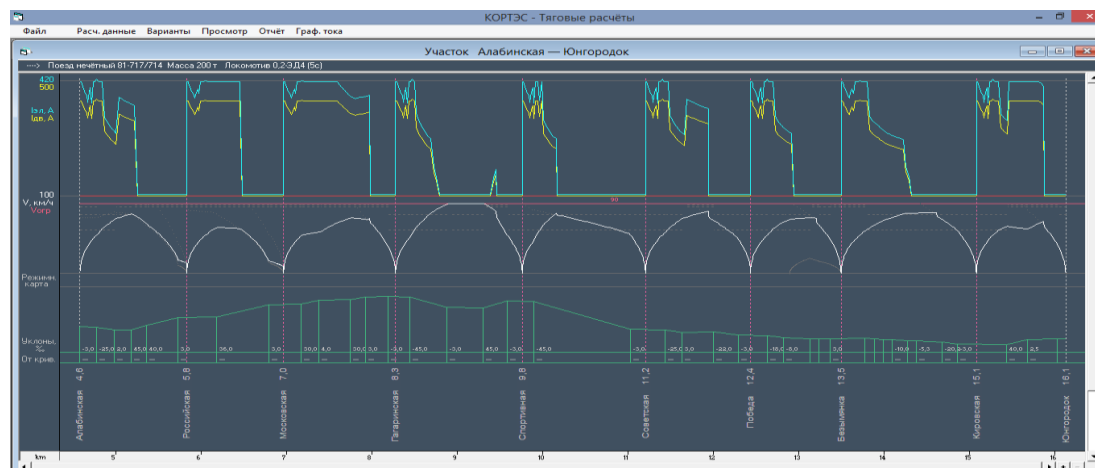


Рисунок 2. Тяговые расчеты для нечетного направления участка Алабинская – Юнгородок

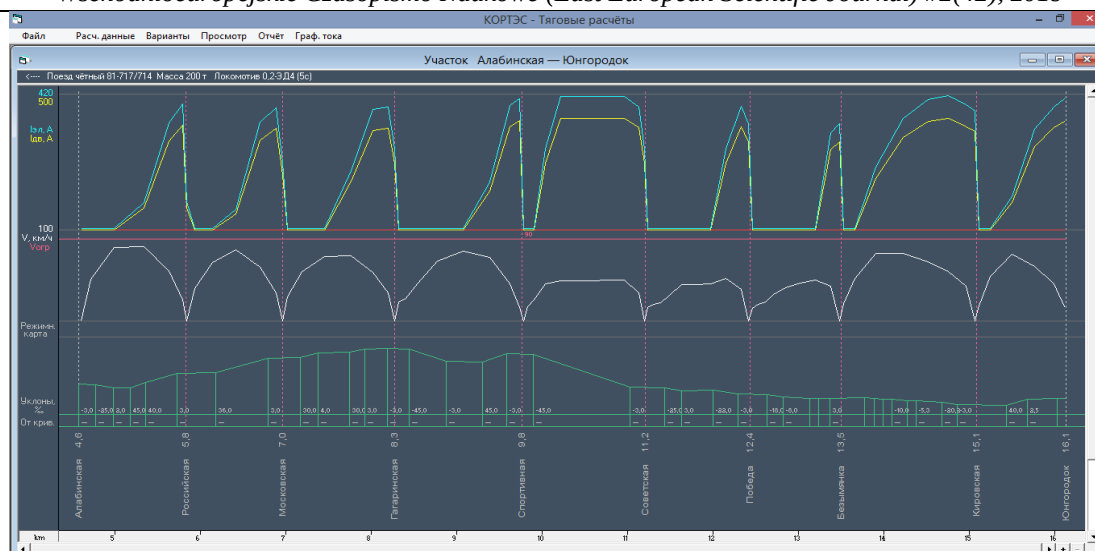


Рисунок 3. Тяговые расчеты для четного направления участка Юнгородок – Алабинская

Для получения корректных результатов тяговых расчетов возникает необходимость пересчета полученных в программе «КОРТЕС» токов, т.к. программа производит расчеты при напряжении в контактной сети 3000 В, а напряжение на контактном рельсе метрополитена составляет 750 В.

Пересчет значений тяговых токов выполнен в программе Microsoft Office Excel изменением расчетных токов обратно пропорционально отношению напряжений тяговой сети (рис. 4).

КОРЕНЬ				
	A	B	C	D
1				
2			Укс расч	Укс пересч
3			3000	750
4	L	V	I	I пересч
5	4,6	17	402	=C\$3/D\$3
6	4,73	44	390	1560

Рисунок 4. Пересчет тяговых токов в программе Microsoft Office Excel

Для проверки полученных результатов принято решение о проведении измерения тока питающего фидера (ЛБ1) тяговой подстанции Победа при движении поезда в четном направлении на участке Победа – Спортивная.

Полученные расчетные значения тяговых токов для нечетного и четного направлений движения представлены в таблице 1, а результат измерения тока – на рис. 5.

Таблица 1

Значения тяговых токов для нечетного и четного направлений движения							
Нечетное направление				Четное направление			
L	V	I расч.	I пересч.	L	V	I расч.	I пересч.
11,21	0	209	836	11,24	15	4	16
11,28	31	377	1508	11,31	18	4	16
11,46	55	358	1432	11,39	20	4	16
11,74	74	307	1228	11,49	28	4	16
12,02	68	67	268	11,63	40	4	16
12,25	48	4	16	11,8	40	4	16
12,4	21	4	16	11,97	41	4	16
				12,15	47	250	1000
				12,33	35	383	1532
				12,42	0	329	1316



Рисунок 5. Максимальный ток питающего фидера

Максимальный ток питающего фидера – 1650 А, максимальный расчетный ток – 1532А, разница между расчетным и реальным током составляет менее 10%, что может быть объяснено влиянием субъективных качеств машиниста.

Таким образом, предложенный метод расчета СТЭ метрополитена при помощи программы для расчета СТЭ магистральных железных дорог «КОРТЭС» можно считать применимым с достаточной точностью.

Список литературы:

1. Электроснабжение железных дорог : методические указания к выполнению курсовой работы для обучающихся по специальности 23.05.05

СОДП, специализация «Электроснабжение железных дорог» очной и заочной форм обучения / составители : М.А. Галанин, Т.В. Бошкарёва, С.А. Блинкова. – Самара : СамГУПС, 2016. – 31 с.

2. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

3. Киселев И.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: учеб. пособие 1 том / И.П. Киселев и др. – М.:ФГБОУ «Учебно – методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 308 с.

Ерошенко Виктор Дмитриевич

К.т.н., инженер-технолог ООО «ГрафитЭл-МЭЗ»,
г. Москва

Овчинников Андрей Николаевич

Ст.преп. каф. «Технология машиностроения и технологические машины и оборудование»
ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова,
г.Новочеркасск

Ефименко Алексей Александрович

магистр каф. «Промышленный и инновационный менеджмент» ЮРГПУ (НПИ),
инженер –электроник 11 разрядаМУП ГЭТ,
г. Новочеркасск

Белянкина Лилия Михайловна

магистр каф. «Технология машиностроения и технологические машины и оборудование»
ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова,
г.Новочеркасск

МОДИФИКАЦИИ РЕЗОЛЬНОЙ ФЕНОЛОФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛЫ СОЛЯМИ МЕДИ ПРИМЕНЯЕМОЙ В КАЧЕСТВЕ СВЯЗУЮЩЕГО

Аннотация:В работе исследована возможность модификации жидкой резольной смолы резорцинатом меди для повышения эксплуатационных свойств изделий на её основе; предложен механизм влияния модификатора на структуру, изучены физико-механические свойства и микроструктура отвержденной модифицированной и чистой смолы.

Abstract:The possibility of modification of the liquid resin by copper resorcinat to improve the performance properties of products based on it is investigated; the mechanism of influence of the modifier on the structure is proposed, the physical and mechanical properties and microstructure of the cured modified and pure resin are studied.

Ключевые слова: модификация резольной смолы; резорцинат меди; фенолят меди; изделия на основе резольной смолы.

Keywords: modification of the resol resin; copper resorcinat; the phenolate of copper; products based on the resol resin.

Введение

Фенолоформальдегидная смола представляет собой продукт поликонденсации фенола и его гомологов с формалином, при этом в зависимости от катализатора получают резольные и новолачные смолы [1]. Фенолоформальдегидные смолы являются связующими веществами для производства различного рода продуктов: мебельной, химической [1], электротехнической [2], графитовой и электродной отрасли [3], в производстве абразивных материалов [4] и химически стойких замазок [5]. При этом в основном свойства изделия в большей степени зависят от физико-механических характеристик связующего. Поэтому процесс целенаправленного изменения свойств фенолоформальдегидной смолы путем её модифицирования является актуальной задачей.

В работах авторов [6, 7] уже была произведена модификация новолачного связующего путем механической активации, а также исследовано влияние модификатора на ряд важных показателей, таких как теплостойкость, трибологические и электрохимические свойства. Авторами объясняется механизм влияния модификатора на структуру фенолоформальдегидной новолачной смолы. Поскольку резольная смола по своей сути схожа с новолачной смолой, то принципиально подход к модификации у них будет одинаковым.

Методика исследований

Для исследования была использована резольная смола согласно ГОСТ 20907-75 «Смолы фенолоформальдегидные жидкие». Технология изготовления смолы имеет главное отличие: процесс поликонденсации смолы происходит при температуре 35-40 °С и длителен по времени (до 7 дней).

В качестве модификатора использовался резорцинат меди. Модификатор получали механической активации эквимольной смеси резорцина и ацетата меди. Резорцинат меди вводился в резольную смолу в виде порошка в количестве 2,6 % от массы смолы, после чего перемешивался до получения однородной жидкости. Полученная смесь периодически перемешивалась на протяжении 3 часов для устранения образования осадка.

Время желатинизации, вязкость по Стоксу, содержание свободного фенола и массовая доля нелетучего остатка при поликонденсации определялись согласно ГОСТ 20907-75 «Смолы фенолоформальдегидные жидкие».

Пористость отвержденной резольной смолы измерялась по ГОСТ 2409-95 «Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения». Отверждение проводилось каталитическим холодным способом пара-толуолсульфокислотой (п-ТСК). Для этого в резольную смолу при температуре 15-20 °С вводилось различное количество п-ТСК, что позволяло отверждать смолу без перегрева и вскипания.

Выход коксового остатка чистой и модифицированной резольной смолы определялся по методике применяемой к пековому связующему. Отвержденная смола помещалась в фарфоровый тигель и накрывалась крышкой. Фарфоровый тигель с крышкой помещался в металлический контейнер и засыпался графитовой пересыпкой. Контейнер ставился в муфельную печь и нагревался со скоростью 1,5 °С/минуту до температуры 700 °С. По изменению массы вычисляется выход коксового остатка.

Термогравиметрические исследования проводились на дериватографе типа Mettler-Toledo TGA/DSC 1 с продувкой воздуха через камеру дериватографа с расходом 30 см³/мин, в режиме равномерного подъема температуры со скоростью 30 °С/мин в интервале температур 30-700 °С.

Микроструктура поверхности отвержденной смолы изучалась при помощи оптического микроскопа стереоскопического БИОМЕД МС-1 ZOOM с увеличением в 50 раз.

Данные экспериментов

В таблице 1 показаны свойства чистой резольной смолы согласно ГОСТ и модифицированной резорцинатом меди, а. Из полученных данных видно, добавление меди увеличивает вязкость смолы на 1,5 секунды, уменьшает время желатинизации почти в 2 раза, но при этом увеличивается количество полимера после поликонденсации.

Таблица 1.

Свойства чистой и резольной смолы согласно ГОСТ 20907-75

Наименование параметра	Чистая смола по ГОСТ 20907-75	Модифицированная резорцинатом меди
Время желатинизации, с	260	142
Вязкость по Стоксу, с	3,6	5,1
Содержание свободного фенола, %	8,8	6,1
Массовая доля нелетучего остатка при поликонденсации, %	67	78
Выход коксового остатка, %	41	65

Это можно объяснить свойством меди связывать гидроксильные группы не только химически и координационно, что стабилизирует их и при нагревании в процессе деструкции не происходит разрушения полимера на простейшие мономеры, а

сразу начинается процесс полукоксования. Это подтверждается и тем, что количество свободного фенола снизилось на 2,5 %, соответственно он вступает в реакцию поликонденсации, а не улетучива-

ется из системы. Также следует отметить, что повышение вязкости происходит разово, в дальнейшем при старении смолы вязкость у модифицированной смолы изменяется незначительно, по сравнению с чистой смолой. Так после 10 дней при температуре окружающей среды 28-30 °С и контакте с воздухом, чистая смола стала отбивать воду, изменять свою окраску на коричневую и становится мутной, в то время как модифицированная сохраняет свою однородность, цвет и прозрачность.

В таблице 2 показано изменение пористости отвержденной смолы в зависимости от количества используемого катализатора п-ТСК. Следует отметить, что при низких количествах катализатора модифицированная смола не отверждалась, а только становилась вязкой, при этом полностью не теряя свою пластичность слоев. Из таблицы видно, что добавление модификатора приводит к получению полимера с меньшей пористостью, а значит более прочному.

Таблица 2.

Зависимость пористости модифицированной и чистой резольной смолы от количества катализатора п-ТСК

Содержание п-ТСК, %	Пористость, %	
	резольная смола	резольная смола + резорцинат меди
1	1,8	-
2	2,5	-
4	-	3,1
5	8,4	5,8
10	15,4	11,7

На рисунке 1 показаны термогравиметрические кривые отвержденного чистого и модифицированного полимера. Из полученных данных видно, что обе смолы обладают хорошей стойкостью до 200 °С, но существенное изменение массы для модифицированной смолы наблюдается после 350 °С, при этом, в то время как чистая резольная смола начинает окисляться. После 500 °С наблюдается значительное различие в окислительной стойкости. Так скорость окисления модифицированной смолы уменьшилась в 4 раза по сравнению с чистой смолой. Это можно объяснить окончанием процесса коксования, происходящим при температуре

350-450 °С, и большей стабильностью образовавшегося кокса. Данные термогравиметрии подтверждают полученные данные о коксовом остатке. При этом, при пересчете количества модификатора в смеси на чистую медь, то получится порядка 0,8 % по массе. Поскольку увеличение массы при коксовании составило больше чем на 20%, что превышает суммарное значение меди и свободного фенола, то это подтверждает участие меди в структурообразовании резольной смолы при карбонизации.

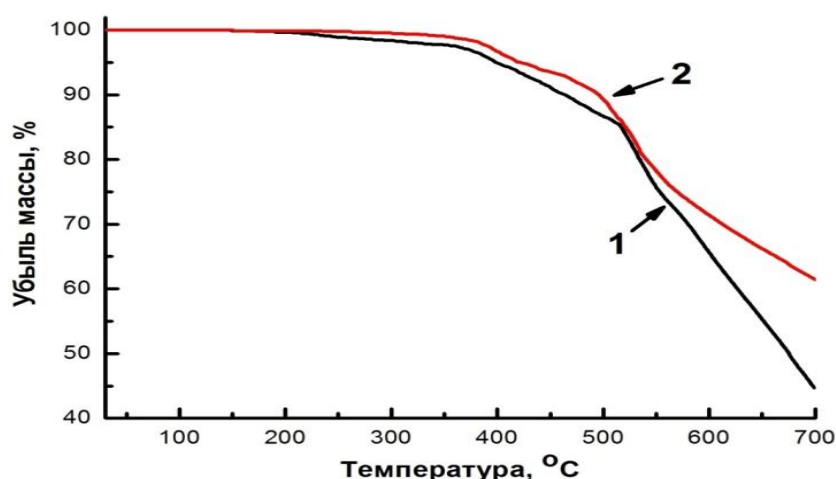


Рисунок 1. Термогравиметрические кривые чистой (1) и модифицированной (2) резольной смолы

На рисунке 2 показано исследование микроструктуры чистой и модифицированной смолы под оптическим микроскопом. Видно, что добавление

резорцината меди приводит к образованию слоистой структуры полимера, в то время как чистая смола имеет пористое строение.

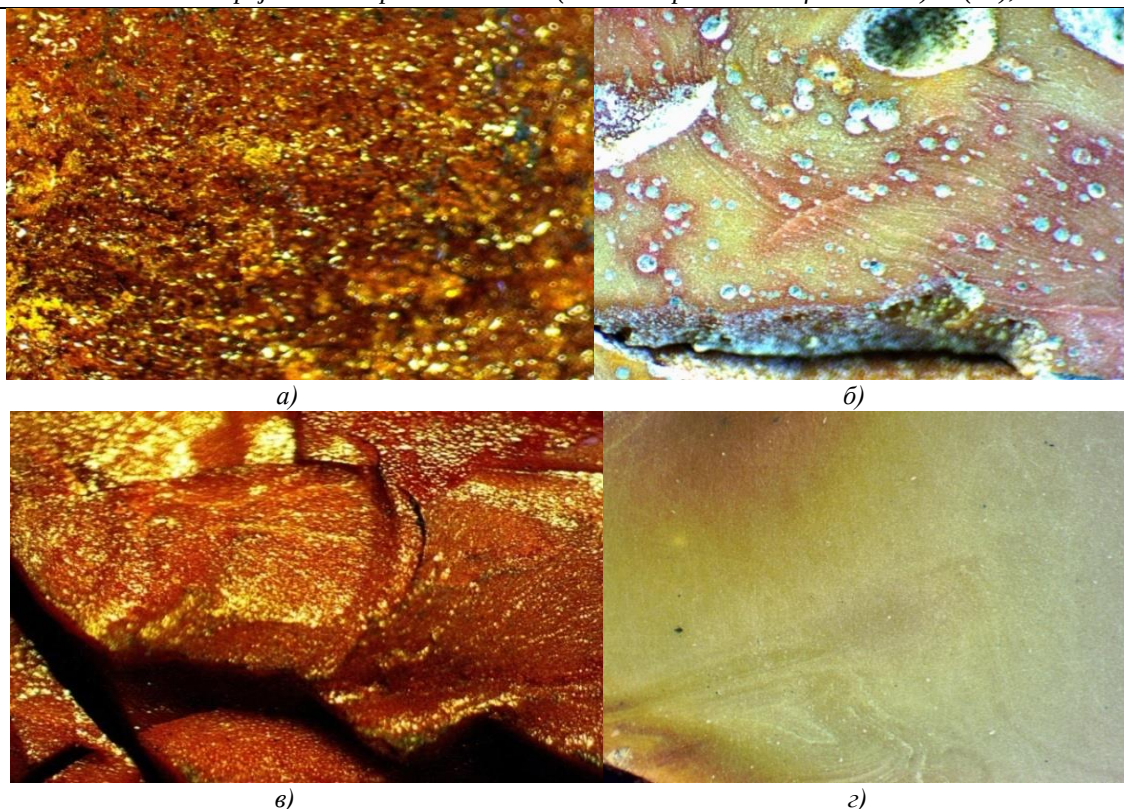


Рисунок 2. Структура поверхности отвержденной чистой (а, б) и модифицированной резольной смолы (в, г): микрошлифы (а, в) и излом (б, г) при увеличении в 50 раз

Вывод

Было доказано, что медь, введенная в виде резорцината меди, модифицирует фенолоформальдегидную смолу резольного типа. Это подтверждает возможность модифицирования фенолоформальдегидных смол новолачного и резольного типа металлами с переменной валентностью. При этом происходит увеличение теплофизических свойств, увеличение сухого остатка полимера и выхода коксового остатка при карбонизации, что очень важно для полимерной и графитовой отрасли. Так же при модифицировании наблюдается стабилизация смолы во времени, ингибируя процесс старения полимера. При каталитическом холодном отверждении п-ТСК у модифицированной смолы наблюдается меньшая величина пористости образца, что очень важно при использовании резолов для приготовления замазки Арзамит, поскольку пористая структура полимера не позволяет создавать герметичность при склеивании химической аппаратуры и теплообменников.

Список литературы:

1. Кноп А., Шейб В. Фенольные смолы и материалы на их основе. / А.Кноп, В. Шейб; пер. с англ. А.М. Василенко, Г.М. Восканянца – М.: Химия, 1983 – 280 с.

2. Самодурова Н.М. Исследование и разработка упрощенной техно-логии производства графитовых щеток / Самодурова Н.М., Барков Л.А., Иванов В.А., Яров Б.А. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2013. Т. 13. № 2. С.77-84.

3. Островский В.С. Основы материаловедения искусственных гра-фитов / В.С. Островский. – М.: Metallurgizdat, 2011. – 112 с.

4. Курдюков В.И. Основы абразивной обработки: учебное пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. 195 с.

5. Смирнов В.К. Химически стойкие замазки арзамит и лаки холодного отверждения [Текст] / В. К. Смирнов, С. Х. Качнельсон ; Под ред. В. И. Кручинина. - Москва: Госхимиздат, 1957. – 52 с.

6. Ерошенко В.Д., Овчинников А.Н., Фокин В.П., Смирнова Н.В. Повышение износостойкости электротехнического углеродного материала путем модифицирования новолачного связующего // Инженерный вестник Дона, 2015, №1 URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2802.

7. Липкина Т.В., Ерошенко В.Д., Емелин А.В., Пушук Д.В., Гончаров И.А., Липкин С.М., Андреев Ю.А., Смирнова Н.В. Устойчивость углеродных материалов к анодному окислению. Анализ возможных факторов // Практика противокоррозионной защиты. 2015. №2 (76). С. 26-37.

Куприянов Вячеслав Васильевич

доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры «Автоматизированные системы управления»

Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

Министерство образования и науки РФ,

Россия, 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ПРОГНОЗОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ С ОБОРУДОВАНИЕМ В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Kupriyanov Vyacheslav Vasilyevich

doctor of technical sciences, professor,

professor of the chair «Automated control systems» of

National University of Science and Technology «MISIS»

Ministry of education and science of Russian Federation,

COMPLEXION OF FORECASTS OF TECHNOLOGICAL SITUATIONS WITH EQUIPMENT IN THE COAL MINE CLEANING FACE

Реферат: Статья направлена на развитие и обоснование одного из подходов к прогнозированию индивидуального остаточного ресурса конкретного, находящегося в эксплуатации горно-шахтного оборудования (ГШО) в очистном забое угольной шахты. Выявлены основные причины, влияющие на точность прогнозов.

Показана перспективность применения комплексированных прогнозов по нескольким аналогам с помощью сплайн-функций для переменных, характеризующих технологические ситуации с ГШО. Приведена процедура краткосрочного прогнозирования многомерного процесса изменения среднегодовых значений переменных, описывающих технологические ситуации (заштыбовка, изгиб конвейера в горизонтальной плоскости, порыв тг, порыв проушин крепи лавы, заваливание секций крепи и т.п.) с конвейером и крепью лавы в очистном забое. Выявлены успешно прогнозируемые и не прогнозируемые переменные. Проведенные комплексированные прогнозы по разным критериям самоорганизации позволили установить оптимальное число аналогов и ранжировать прогнозируемые переменные комбайна и крепи по точности прогноза.

Показано, что комплексирование прогнозов состояний очистного оборудования по двум аналогам дает большее количество прогнозируемых переменных, чем по одному и трём аналогам. При прогнозе по методу комплексирования аналогов из 12 переменных 10 успешно прогнозируются. Показана возможность прогноза многомерных технологических ситуаций и при наличии тренда.

Abstract: The article is aimed at developing and substantiating one of the approaches to forecasting the individual residual resource of a particular mining equipment in operation in a coal mine clean-up area. The main causes that affect the accuracy of forecasts are identified.

The prospects of using complex forecasts on several analogs with the help of spline functions for variables, characterizing the technological situations with GGOs, are shown. The procedure of short-term forecasting of the multidimensional process of changing the average annual values of variables describing technological situations (zashtybovka, bending of the conveyor in the horizontal plane, the rush of traction, the rush of the lash lugs, lining the securing sections, etc.) with the conveyor and lava supports in the cleaning face. Successfully predictable and non-predictable variables are identified. Conducted complex forecasts for different criteria of self-organization allowed to determine the optimal number of analogs and to rank the forecasted variables of the combine and krepі according to the accuracy of the forecast.

It is shown that the combination of the state forecasts of the cleaning equipment by two analogs gives a greater number of predicted variables than one and three analogues. When predicted by the method of integrating analogues of 12 variables, 10 are successfully predicted. The possibility of forecasting multidimensional technological situations and in the presence of a trend is shown.

Ключевые слова: переменная, прогноз, аналог, сплайн-функции, критерий, баланс дискретизаций, предиктор, очистной забой, ресурс, технологическая ситуация, комбайн, крепь лавы, заштыбовка, метод комплексирования, селекция, погрешность.

Key words: variable, forecast, analog, spline functions, criterion, balance of discretizations, predictor, clearing face, resource, technological situation, combine, lava support, zashtybovka, method of integration, selection, error.

Введение

В настоящее время все более актуальными становятся задачи прогнозирования состояния ГШО

на угледобывающих предприятиях в условиях постоянного роста удельного веса машин и механизмов в структуре промышленно-производственных

фондов. В современных условиях цена ошибки от необоснованных решений управленческого характера сводится к большим потерям для производства. Поэтому особый интерес вызывают вопросы прогнозирования индивидуального остаточного ресурса ГШО на стадии его эксплуатации. Их решение опирается на графики планово-предупредительного ремонта, технологические карты по безопасному техническому обслуживанию и ремонту оборудования шахты, журнальные отчёты горных мастеров. При этом используется текущая информация об объекте, полученная в результате хронометражных наблюдений и измерений во время эксплуатации, например, механизированных комплексов очистных забоев [1,7,8].

Многочисленные исследования функционирования очистных забоев, как объектов прогнозирования показывают, что они представляют собой сложную динамическую систему. Если попытаться уточнить понятие сложности, то, прежде всего, необходимо выделить многомерность, нестационарность, стохастичность производственного комплекса. Забой лавы проходит участки геологических осложнений, поэтому явно присутствует влияние, причём, стохастическое, условий эксплуатации на состояние оборудования. Поэтому считается, что процесс добычи угля весьма сложен для прогноза. Необходимо прогнозировать переменные, описывающие технологические состояния очистного оборудования на стадии эксплуатации. То есть, определять какие переменные успешно прогнозируются и какие не прогнозируются. Поскольку от них зависит решение задачи индивидуального прогнозирования ресурса, то есть оценка рисков по отношению к аварийным ситуациям, установление допустимых остаточных сроков эксплуатации при наличии возрастающего риска и т.п.

Теория вопроса

Ивахненко А.Г. была высказана мысль о том, что популярными в научной среде детерминистическими методами синтеза алгебраических уравнений однократного прогноза, основанных на регрессионных алгоритмах, не предусматривающих свободы выбора решения, просто невозможно решать сложные задачи, например, предсказать количество воды в реке через 10 лет [3]. Формирование точных прогнозов усложняется тем, что многие случайные процессы настолько стохастичны, что принципиально не поддаются математическому или иному прогнозированию. Процессов, не поддающихся прогнозу, очень мало, меньше, чем может казаться на первый взгляд. Большинство случайных процессов прогнозируемы с большой точностью.

Отсутствие удачных прогнозов объясняется и тем, что для прогнозов обычно применялись слишком простые (линейные и квадратичные) уравнения прогнозирования. Утверждение о том, что простые соотношения более соответствуют истине, чем сложные, справедливо только для простых детерминированных случаев. В сфере стохастических явлений действуют сложные, нелинейные соотношения [7, с.200].

До сих пор рассматривали вопросы прогнозирования случайных процессов, представленных рядом дискретных точек. Эксперты предсказывают определённые события, а не значения случайных процессов. Во многих случаях прогноз единичных событий не отличается от прогнозирования непрерывных случайных процессов. Например технологические ситуации с ГШО изменяются под воздействием определенных факторов, одни из которых участь строго математически сложно, а другие возможно. Хотя бы с определенной степенью уверенности. Например, остановка электродвигателя есть пример единичного события. Но ясно, что событие непосредственно связано с ходом роста температуры нагрева его комплектующих элементов. А прогноз температуры есть прогнозирование случайного процесса. Возможно оценить также и существующую постоянную времени износа оборудования в очистном забое.

Поэтому прогноз единичных событий, которые отличаются тем, что уже они бывали в прошлом, не только возможен, но и почти не отличается от прогноза непрерывных случайных процессов. А вот прогнозирование событий, которых еще никогда не было, весьма затруднительно. Некоторая возможность здесь скрыта в исследовании аналогичных явлений. Ведь "смутная" память человека наверняка как раз и представляет собой большой набор аналогов, в чём-то (по законам близости изображений распознавание образов) похожих на ситуацию, относительно которой нужно принять решение в данный момент. Задача часто состоит в выборе и обосновании выбора подходящего аналога для решения той или иной проблемы.

Как правило, изменения технологических параметров ГШО часто приводят к возникновению аварий. При некоторых видах аварий, например, при обрыве цепи конвейера, при сходе струга с направляющих и т.п., работа по добыче невозможна. При авариях же с механической частью крепи в лаве, при частичной заштыбовке конвейера можно продолжать работу по добыче. Как известно, аварии это события, повторяющиеся с определенными циклами [5,7,с.200]. Есть определенные циклы и периоды, когда события могут повторяться каждые 5-7 лет или каждые 10-12 лет и, их число должно быть одинаковым. Необходимо рассмотреть применение к предсказанию состояний очистного забоя метод прогноза случайных процессов при помощи поиска аналога или нескольких аналогов в предыстории. Формально в качестве исходных данных можно взять выборку наблюдений многомерного процесса в очистном забое, но при условии, что эта выборка достаточно представительна для описания состояний забоя как объекта наблюдения. Поэтому то, что случилось в прошлом, повторяется еще раз в данное время, если исходное состояние было аналогичным.

Для прогноза погоды и изменения климата требуется наличие длинной и разнообразной выборки данных при стационарном характере многомерного процесса. Поскольку при прогнозе состояний

очистного забоя количество предсказываемых переменных значительно превышает число точек прогноза (лет наблюдений), то целесообразно использовать метод комплексирования прогнозов по нескольким аналогам. Прогнозы не рассчитываются, а берутся из таблицы данных наблюдений. Преимущества этого метода были показаны в работах [1,6,с.46,7] при решении задач прогнозирования многомерных процессов в экологических системах. Известные алгоритмы экстраполяции, например, МГУА, как правило, успешно прогнозируют лишь небольшое число переменных многомерного процесса.

Точность прогноза каждой переменной, например, очистного забоя, типичных подземных аварий, таких как взрывы, пожары, горные удары, оценивается по величине вариации:

$$\delta_i^2(x_i) = \sum_{k=1}^K (x_{i(k)} - \hat{x}_{i(k)})^2 / (x_{i(k)} - \bar{x}_{i(k)})^2, \quad (1)$$

где $x_{i(k)}$ – фактическое значение i -й переменной; $\hat{x}_{i(k)}$ – прогнозное значение; $\bar{x}_{i(k)}$ – среднее значение (без учета прогнозируемой точки); k – номер года наблюдения.

Если процесс нестационарный, когда часть переменных непрерывно растет или снижается по величине, то согласно [1] величина $\bar{x}_{i(k)}$ принимается равной значению "тренда" на k -шаге прогноза. Числитель в формуле (1) определяет среднюю ошибку прогноза по методу аналогов, а ее знаменатель – среднюю ошибку обычного прогноза по среднему. По сути в (1) сравниваются эти две ошибки. Поэтому, когда прогноз по аналогам позволяет получить более точную информацию, чем прогноз по среднему, он считается оправданным или эффективным. Обычно прогноз каждой переменной считается успешным, если вариация $\delta_{i(k)}^2 \leq 1,0$. Как правило, только часть переменных предсказывается хорошо. Общим показателем успешности предсказания многомерного процесса считается процент или доля переменных τ , (%), для которых $\delta_{i(k)}^2 \leq 1,0$. Именно для максимально возможного увеличения этого процента для всех M переменных при короткой выборке исходных данных, например, горно-производственной деятельности, целесообразно переходить от поиска одного аналога в предыстории к комплексированию прогнозов нескольких аналогов. Кроме того, появляется возможность указать переменные, например, очистного забоя, в качестве предикторов и ранжировать их по эффективности конечного результата прогнозирования при переборе 3-х аналогов, начиная с одного аналога.

Изложение основного материала

Будем рассматривать комплексирование прогнозов нескольких аналогов с помощью 2-х подходов и сравнения их по эффективности (успешности) предсказания на примере прогноза параметров ГШО очистного забоя шахты. Первый из них основан на использовании сплайн-функций со степен-

ными коэффициентами по критерию вариации прогноза, а другой – на переборе эвристик (число аналогов, состав множества переменных, степень коэффициентов сплайн-функций) по критерию непротиворечивости или баланса дискретизаций. Последний подход непосредственно вытекает из принципов самоорганизации или массовой селекции. Эти подходы позволят установить не только число успешно прогнозируемых переменных очистного забоя, но и выявить переменные, возможно не учтенные в данной работе и, имеющие "размытый" прогноз, к которым полезнее применить аппарат нечеткой логики Л. Заде.

По первому подходу каждой строке выборки исходных данных соответствует точка как в многомерном пространстве переменных x_i , так и в пространстве прогнозов $\hat{x}_i$. Первое пространство необходимо для определения межточечных расстояний, а второе – для аппроксимации прогнозов с помощью сплайн-функций. Для прогноза выбирается выходная точка C пространств x_i и $\hat{x}_i$, в качестве которой принимается либо последняя по времени точка выборки, либо предпоследняя для оценки вариации прогноза по последней строке. Расстояния от выходной точки C до всех остальных в пространстве x_i используются для определения аналогов, а именно: ближайшая точка A_1 является первым (основным) аналогом; следующая по расстоянию точка A_2 – вторым аналогом и т.д., вплоть до последнего аналога A_N . В пространстве прогнозов каждому аналогу соответствует определенный прогноз $\hat{x}_i$. Комплексирование представляет собой аппроксимацию прогнозов нескольких аналогов, обычно ближайших к точке C . Число учитываемых аналогов при комплексировании определяется экспертным путем. Для комплексирования будем использовать экстраполяцию пространства прогнозов с помощью сплайн-функций, но при допущении, что в каждой точке этого пространства присутствует значение прогноза, вычисляемое при помощи прогнозов, полученных в соседних точках пространства. В качестве сплайн функций применяется полный полином следующего вида [4]:

$$\hat{x}_{i(C)} = a_0 + a_1 \hat{x}_{i(A_1)} + \dots + a_N \hat{x}_{i(A_N)}, \quad (2)$$

где i – номер переменной.

Соотношение (2) соответствует параметрическому заданию многомерной функции, в которой число слагаемых, оценки их коэффициентов могут быть найдены теми или иными алгоритмами. Но в этом случае не будет учтена близость точек, характеризующих аналоги A_i , к выходной точке в многомерном пространстве прогнозов. Нужно выбрать сплайн-функции так, чтобы различие прогнозов в этих точках уменьшалось. А это ведет к увеличению сходства самих прогнозов на выходе с группой выбранных аналогов. С этой целью вычисляются метрические евклидовы расстояния между точками в пространстве $\hat{x}_i$:

расстояние от выходной точки С до первого (ближайшего) аналога A_1

$$d_1 = [(x_{1(A1)} - x_{1(C)})^2 + (x_{2(A1)} - x_{2(C)})^2 + \dots + (x_{M(A1)} - x_{M(C)})^2]^{1/2}, \quad (3)$$

расстояние от точки С до второго, более удаленного аналога A_2

$$d_2 = [(x_{1(A2)} - x_{1(C)})^2 + (x_{2(A2)} - x_{2(C)})^2 + \dots + (x_{M(A2)} - x_{M(C)})^2]^{1/2} \quad (4)$$

расстояние от точки С до третьего, еще более удаленного аналога A_3

$$d_3 = [(x_{1(A3)} - x_{1(C)})^2 + (x_{2(A3)} - x_{2(C)})^2 + \dots + (x_{M(A3)} - x_{M(C)})^2]^{1/2}, \quad (5)$$

где М-количество предсказываемых переменных.

Метрические расстояния далее используются для формирования следующих сплайн-функций [4]:

- при одном аналоге (В=1):

$$\hat{x}_{i(C)} = \hat{x}_{i(A1)}; \quad (6)$$

- при учете прогнозов двух аналогов (В=2):

$$\hat{x}_{i(C)} = \left(\frac{1}{d_1} \hat{x}_{i(A1)} + \frac{1}{d_2} \hat{x}_{i(A2)} \right) \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)^{-1} \quad (7)$$

- при учете прогнозов трех аналогов (В=3):

$$\hat{x}_{i(C)} = \left(\frac{1}{d_1^2} \hat{x}_{i(A1)} + \frac{1}{d_2^2} \hat{x}_{i(A2)} + \frac{1}{d_3^2} \hat{x}_{i(A3)} \right) \left(\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_3^2} \right)^{-1}, \quad (8)$$

где В- количество учитываемых аналогов; $1 \leq B \leq N$, N- число прогнозных точек.

Можно записать выражения для сплайн-функций при учете четырех, пяти и более аналогов. Но практически количество успешно и удовлетворительно прогнозируемых переменных с ростом числа аналогов не только не увеличивается, но даже и снижается. Это показано ниже в данной работе. Поэтому опустим эти выражения. Укажем на важное обстоятельство, вытекающее из формул (7), (8). А именно: из (7) следует, что при

$$d_1 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} = \hat{x}_{i(A1)}; \text{ при } d_2 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} = \hat{x}_{i(A2)} \quad (9)$$

а из (8) видно, что

$$\left. \begin{aligned} \text{при } d_1 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} &= \hat{x}_{i(A1)} \\ \text{при } d_2 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} &= \hat{x}_{i(A2)} \\ \text{при } d_3 = 0 \quad \hat{x}_{i(C)} &= \hat{x}_{i(A3)} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Соотношения (9) и (10) можно считать контрольными для сплайн-функций (6), (7), (8). Их справедливость легко доказывается из (7), (8) с помощью известного правила Лопиталья для раскрытия ситуаций бесконечности.

Обработка данных. Обсуждение результатов

Данные наблюдений были получены на шахте "Северная" шахтоуправления "Воркутауголь" за 8 лет (с 2005 года по 2012 год). Измерению подлежали 12 переменных (М=12): x_1 - заштыбовка конвейера; x_2 - изгиб конвейера в горизонтальной плоскости; x_3 - доля порывов замковых соединений конвейера; x_4 - доля механических повреждений земника конвейера; x_5 - доля отрывов гидростоек от опор крепи лавы; x_6 - деформация раздвижных кожухов перекрытий крепи лавы; x_7 - доля порывов тяг крепи; x_8 - доля проваливаний оснований крепи; x_9 - доля порывов проушин крепи; x_{10} - доля перекосов секций крепи на сборном штреке; x_{11} - доля перекосов секций крепи на запасном штреке; x_{12} - доля заваливаний секций.

Попробуем выделить из 12 переменных, характеризующих нештатные ситуации с конвейером и крепью лавы, некоторое множество, поддающееся успешному и удовлетворительному прогнозированию при помощи комплексирования прогнозов. Исходные данные рассматривались в качестве координат восьми точек наблюдений в двенадцатимерном пространстве переменных. Они были нормированы по формуле:

$$x_i = (X_i - X_{i \max}) / (X_{i \max} - X_{i \min}).$$

В результате данные были табулированы и представлены выборкой размерности $N \times M$ ($N=8$). Последний (2012 год) был оставлен для вычисления вариации δ_i^2 (проверка). Тогда выходной будет 7-ая точка (2011 год) 12-мерного пространства. Для вычисления аналога имеем семь точек ($N-1=7$). На основании исходных данных по формулам (3)-(5) были найдены метрические межточечные расстояния от выходной точки С до остальных шести точек и выполнен выбор трех ближайших точек в качестве аналогов. Такими аналогами оказались: A_1 - первая точка, $d_1 = 1,642$; A_2 - третья точка, $d_2 = 1,685$; A_3 - четвертая точка, $d_3 = 1,868$.

Далее путем сдвига номеров точек исходных данных на единицу было найдено пространство прогнозов, аппроксимация которого сплайн-функциями с вычислением значения прогноза в выходной точке и представляет собой комплексирование. Успешность прогноза каждой переменной в этой точке определяется по вариации $\delta^2(x)$. Результаты вычислений показаны в табл. 1, из которой видно, что наибольшее число успешно прогнозируемых переменных достигается при наличии трех аналогов A_1 , A_2 и A_3 . Их семь, в табл. 1 они отмечены знаком "+", а "размытые" прогнозы показаны знаком "-". Их обычно считают предикторами прогноза. Все переменные можно ранжировать по вариации прогноза и получить следующий ряд:

$$\frac{\delta^2(x) < 1,0}{x_{10}x_7x_{11}x_6x_3x_4x_2} \mid \frac{\delta^2(x) \geq 1,0}{x_9x_{12}x_8x_5x_1}.$$

Видно, что лучшим предиктором является доля перекосов секций крепи на сборном штреке, а худшим - заштыбовка конвейера очистного забоя. По сути метод аналогов позволил выявить эффективный ансамбль предикторов - признаков, не упустив ни одного из них.

Прогноз по трем аналогам на 2012 год (последний год исходной выборки данных) выполнялся с целью выявления оптимального числа учитываемых аналогов (3 аналога) и оптимального ансамбля прогнозируемых переменных (7 переменных) очистного забоя. Чтобы сделать прогноз на следующий, 2013 год, необходимо допустить, что оптимальное число аналогов и ансамбль переменных на последнем шаге выборки остаются без изменения.

Таблица 1

Данные для выбора эффективных прогнозов по критерию вариации

$$\delta^2(x)(\delta^2(x) < 1,0)$$

Используемые аналогии	Вариации прогноза												Число успешных прогнозов	τ , %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}		
$A_1 = 2005$ г.	- 4,5	+ 0,47	- 1,58	- 2,40	- 1,19	- 3,45	- 2,42	- 4,02	- 1,62	+ 0,49	+ 0,68	- 3,21	3	25
$A_1 = 2005$ г. $A_2 = 2007$ г.	- 5,2	+ 0,78	- 1,86	+ 0,95	- 1,51	- 2,21	- 1,38	- 1,45	+ 0,98	+ 0,28	+ 0,48	- 2,42	5	41,7
$A_1 = 2005$ г. $A_2 = 2007$ г. $A_3 = 2008$ г.	- 5,3	+ 0,86	+ 0,67	+ 0,73	- 1,18	+ 0,39	+ 0,25	- 2,04	- 1,14	+ 0,18	+ 0,26	- 1,15	7	58,3

Аналогами будут данные за 2006, 2008 и 2009 годы. С помощью сплайн-функций (6)-(10) удастся найти комплексированные прогнозы на 2013 год. Указанное допущение не требуется, если критерий вариации заменить на критерий баланса дискретизаций BL^2 [3]. Этот критерий требует, чтобы модель, найденная при дискретизации переменных на N -уровней (N -число строк выборки), как можно меньше отличалась от модели, получаемой путем дискретизации на $N/2$ уровней. Частный критерий баланса дискретизаций для каждой i -й переменной равен [4]

$$b_i^2 = [\hat{x}_i(N) - \hat{x}_i(N/2)]^2 \quad (11)$$

где $\hat{x}_i(N)$, $\hat{x}_i(N/2)$ – прогнозы дискретизированных значений i -й переменной.

Общий критерий баланса BL^2 имеет вид

$$BL^2 = \sum_{i=1}^M b_i^2 \rightarrow \min. \quad (12)$$

Перебору подлежат все варианты использования точек по одной, две, три и т.д. в качестве аналогов, вплоть до учета всех точек (строк) выборки. При этом 12 исходных переменных назначаются экспертами априорно, а показатель степени коэффициентов сплайн-функции принимается на единицу меньше размерности пространства аналогов. При переборе точек ранжирование можно прекратить, как только увеличение числа переменных перестает снижать критерий (12), что означает достижение им минимума. Но к пороговому значению критерия (12) предъявим другие требования. Будем считать прогноз хорошим, если $BL^2 < 0,8$; удовлетворительным, если $0,8 \leq BL^2 < 1,0$; "размытым", если $BL^2 \geq 1,0$. Для этого строятся вспомогательные выборки двух инструментальных переменных

$\hat{x}_i(N)$ и $\hat{x}_i(N/2)$, одна из выборок-путем дискретизации данных исходной выборки на 8 уровней, а вторая - дискретизацией на 4 уровня. В отличие от предыдущего случая, в качестве выходной точки можно взять точку номер восемь (данные за 2012 год), поскольку вариация $\delta_i^2(x)$ не рассчитывается и, поэтому проверочная последовательность не нужна.

По Хэммингу были вычислены метрические межточечные расстояния от выходной точки до всех остальных. Найдено

$$\begin{aligned} d_{(8-1)} &= |x_1(8) - x_1(1)| + |x_2(8) - x_2(1)| + |x_3(8) - x_3(1)| + \dots + |x_{12}(8) - x_{12}(1)| = 37; \\ d_{(8-2)} &= 38; d_{(8-3)} = 32; d_{(8-4)} = 33; d_{(8-5)} = 28; d_{(8-6)} = 42; d_{(8-7)} = 41. \end{aligned}$$

По мере близости к выходной точке аналогами являются: A_1 - пятая точка, A_2 - третья точка, A_3 - четвертая точка, A_4 - первая точка, A_5 - вторая точка и т.д. Далее выполняется оценка по критерию баланса дискретизаций всех переменных x_i при числе аналогов $B=3$. Например, прогнозы аналогов на 2013 г. (девятая точка выборки) по первой переменной составили: $\hat{x}_{1(A1)} = 0,125$; $\hat{x}_{1(A2)} = 0,625$; $\hat{x}_{1(A3)} = 0,500$.

Комплексированный прогноз $\hat{x}_1$ на 2013 год рассчитывается по формуле (8) при дискретизации на восемь уровней пространства переменных x_i и найденных значениях $d_1 = 1$, $d_2 = 4$, $d_3 = 2$ по первой вспомогательной выборке. Получено, что $\hat{x}_{1(c)} = 0,220$. После дискретизации на восемь уровней пространства переменных и вычисления значений $\hat{x}_{i(A1)}$, $\hat{x}_{i(A2)}$, $\hat{x}_{i(A3)}$ по каждой x_i комплексированные прогнозы остальных переменных на 2013 год при $B=3$ оказались следующими:

$\hat{x}_{2(C)}=0,502$; $\hat{x}_{3(C)}=0,423$; $\hat{x}_{4(C)}=0,181$; ; $\hat{x}_{5(C)}=0,310$;
 $\hat{x}_{6(C)}=0,455$; $\hat{x}_{7(C)}=0,583$; $\hat{x}_{8(C)}=0,829$; $\hat{x}_{9(C)}=$
 $0,831$; $\hat{x}_{10(C)}=0,792$; $\hat{x}_{11(C)}=0,546$; $\hat{x}_{12(C)}=0,352$.

Комплексированный прогноз каждой из 12-ти переменных на 2013 год при дискретизации на четыре уровня при $B=3$ составил: $\hat{x}_{1(C)}=0,500$; $\hat{x}_{2(C)}=1$; $\hat{x}_{3(C)}=0,778$; $\hat{x}_{4(C)}=1$; $\hat{x}_{5(C)}=1,333$; $\hat{x}_{6(C)}=1$; $\hat{x}_{7(C)}=0,500$; $\hat{x}_{8(C)}=1,500$; $\hat{x}_{9(C)}=1,750$; $\hat{x}_{10(C)}=2$; $\hat{x}_{11(C)}=1,184$; $\hat{x}_{12(C)}=0,500$. Частные критерии баланса b_i^2 , характеризующие эффективность каждой переменной и рассчитанные по (11), оказались в пределах от 0,007 для $\hat{x}_7$ до 1,46 для $\hat{x}_{10}$. Сформировался ранжированный по b_i^2 ряд предикторов при комплексировании прогнозов трех аналогов:

$$\frac{BL^2 < 0,8}{x_7 x_{12} x_1 x_3 x_2 x_6 x_{11} x_8 x_4} \quad \frac{0,8 \leq BL^2 < 1,0}{x_9} \quad \frac{BL^2 \geq 1,0}{x_5 x_{10}}.$$

Ранжированный ряд переменных при комплексировании прогнозов двух аналогов оказался следующим:

$$\frac{BL^2 < 0,8}{x_7 x_1 x_{12} x_3 x_4 x_6 x_2 x_5 x_{11} x_9} \quad \frac{0,8 \leq BL^2 < 1,0}{-} \quad \frac{BL^2 \geq 1,0}{x_8 x_{10}}.$$

При этом частные критерии баланса уложились в диапазон от 0,0279 для x_7 до 1,460 для x_{10} .

По сути прогнозы по 2-м и 3-м аналогам совпали, хотя по наибольшему числу успешно прогнозируемых переменных приоритет за двумя аналогами (10 успешных прогнозов против 9) при двух "размытых" прогнозах. Объяснением этого может служить эвристическая сущность параметра B , т.е. он "свободен" при выборе решения. Лучшими предикторами являются доля порывов тяг крепи лавы, заштыбовка конвейера и заваливание секций крепи, а худшим – доля перекосов секций крепи на сборном штреке. Результаты расчетов по критерию BL^2 представлены в табл. 2. Сравнивая сформированные ряды с рядом, найденным при помощи критерия вариации прогноза, видим, что разным критериям соответствуют различные ансамбли эффективных предикторов.

Прогнозы на 2013 год, комплексированные по двум аналогам, отобранным по критерию $BL^2 < 0,8$, будут следующие: $\hat{x}_{7(C)}=0,333$; $\hat{x}_{1(C)}=0,225$; $\hat{x}_{12(C)}=0,188$; $\hat{x}_{3(C)}=0,208$; $\hat{x}_{4(C)}=0,528$; $\hat{x}_{6(C)}=0,438$; $\hat{x}_{2(C)}=0,406$; $\hat{x}_{5(C)}=0,300$; $\hat{x}_{11(C)}=0,625$; $\hat{x}_{9(C)}=0,708$. Преимущество критерия BL^2 в сравнении с критерием вариации очевидно, так как первый из них позволяет сделать прогноз большего числа переменных за пределами исходной выборки данных. И даже в этом случае он более точен.

Таблица 2

Данные для выбора ансамбля эффективных прогнозов по критерию баланса дискретизаций при прогнозе на 2013г.

Используемые аналоги	Критерий баланса дискретизаций												Число успешных прогнозов	τ , %
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}		
$A_1=2009$ г.	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-	5	41,7
	0,8	1,89	0,77	0,25	3,52	2,25	3,52	3,52	3,52	0,02	0,25	1,890		
$A_1=2009$ г. $A_2=2007$ г.	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	10	83,3
	0,1	0,35	0,21	0,22	0,49	0,32	0,03	1,00	0,63	1,46	0,50	0,097		
$A_1=2009$ г. $A_2=2007$ г. $A_3=2008$ г.	+	+	+	+	-	+	+	+	*	-	+	+	9	75
	0,1	0,25	0,13	0,67	1,05	0,30	0,01	0,45	0,85	1,46	0,41	0,02		

Выводы и предложения

Описанный подход можно применить для краткосрочного предсказания таких типичных аварий в шахтах, как взрывы, пожары, горные удары, затопления горных выработок. Возможно, при подобных авариях столкнемся с прогнозированием нестационарных стохастических процессов при наличии трендов, когда многие переменные будут непрерывно увеличиваться или уменьшаться. А это затруднит поиск аналогов. Выделив тренд одним из известных способов, изложенный подход можно использовать для прогноза отклонений от тренда. Очевидно, что та или иная статистика по указанным авариям существует и аналоги могут быть определены. Вопрос лишь в том, сколько их потребуется. Для пошагового прогнозирования нештатных ситуаций важен переход к квазистационарности наблюдаемых процессов. А количество успешно

прогнозируемых переменных остается общим показателем эффективности любого процесса. Расчеты могут вестись по приведенным выше критериям прогноза.

Повторением процедуры пошагового прогнозирования можно добиться долгосрочного прогноза на любой угольной шахте с упреждением до нескольких шагов, а при времени прогноза более четырех шагов (лет) можно применить в качестве меры близости выходной точки к аналогам канонический коэффициент корреляции.

Список литературы

1. Ивахненко А.Г., Ивахненко Н.А., Костенко Ю.В. Непараметрические прогнозирующие модели МГУА // Автоматика.-1989.-№3.-С.3-10.

2. Качурин Н.М. Прогноз метановой опасности угольных шахт при интенсивной отработке угольных пластов. / Н.М. Качурин, В.И. Клишин, А.М. Борщевич, А.Н. Качурин. – Тула: ТулГУ, 2013.-219с.
3. Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Дмитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. –М.: Сов. Радио, 1978-280с.
4. Кожевников Ю.В. Введение в математическую статистику. –Казань: КГТУ, 2013.-196с.
5. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Разработка рекомендаций по повышению эффективности управления газовой выделением на выемочных участках // Вестник Кузбасского государственного технического университета.-2016.-№5.-С.138-142.
6. Куприянов В.В., Баранникова И.В. Методологические аспекты диспетчерского контроля газовой воздушных ситуаций на участках шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень.-2016.-№9.-С.46-58.
7. Куприянов В.В., Мацкевич О.А., Бондаренко И.С. Параметрические и непараметрические модели прогнозирования нештатных ситуаций в подземных горных выработках // Горный информационно-аналитический бюллетень.-2018.-№3.-С.200-207.
8. Куприянов В.В., Стадник Д.А., Компаниец Б.И. Оценка остаточного ресурса горно-шахтного оборудования – одна из важнейших задач при управлении выемочным участком угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень.-2008.-№10.-С.329-336.

Literary list

1. Ivakhnenko AG, Ivakhnenko NA, Kostenko Yu.V. Nonparametric predictive models of GMDH // Avtomatika.-1989.-№3.-P.3-10.
2. N.M. Kachurin. Forecast of methane hazard of coal mines with intensive mining of coal seams. / N.M. Kachurin, V.I. Klishin, A.M. Borshchevich, A.N. Kachurin. - Tula: Tula State University, 2013.-219p.
3. Ivakhnenko A.G., Zaichenko Yu.P., Dmitrov V.D. Decision-making on the basis of self-organization. -M.: Sov. Radio, 1978.-280p.
4. Kozhevnikov Yu.V. Introduction to mathematical statistics.-Kazan: KSTU, 2013.-196p.
5. Kozyreva E.N., Shinkevich M.V. Development of recommendations to improve the efficiency of gas management at the excavation sites // Bulletin of the Kuzbass State Technical University.-2016.-No. 5.-P.138-142.
6. Kupriyanov V.V., Barannikova I.V. Methodological Aspects of the Dispatch Control of Gas-Air Situations at Mine Sites // Mining Information Analytical Bulletin.-2016.-No.-P.46-58.
7. Kupriyanov V.V., Matskevich O.A., Bondarenko I.S. Parametric and nonparametric models for predicting off-normal situations underground mines // Mining Information Analytical Bulletin.-2018.-№3.-P.200-207.
8. Kupriyanov V.V., Stadnik D.A., Kompaniets B.I. Estimation of the residual resource of a mining equipment is one of the important problem for control area of coal main excavation // Mining Information Analytical Bulletin.-2008.-№10.-P.329-336.

Mozgovy A. O.

*candidate of technical sciences, associate professor,
Kharkiv National University of Construction and Architecture*

GENERALIZED ASSESSMENT OF THE RISK OF ACCIDENT ON HYDRO STRUCTURES OF THE CASCADE OF HYDROPOWER PLANTS

Мозговий Андрій Олексійович

*кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки та підземних споруд
Харківський національний університет будівництва та архітектури*

УЗАГАЛЬНЕНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ НА ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУДАХ КАСКАДУ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Summary: An algorithm of probabilistic assessment of the reliability of hydro structures of hydropower schemes of the cascade of hydropower stations in the framework of the system reliability theory is proposed. Correlations between natural factors are taken into account: correlations between flood water flows, correlations between ice thickness in reservoirs of cascade of hydroelectric units and correlations between temperature influences in hydropower schemes of the cascade. The laws of distribution of random variables of natural factors are represented by systems of random correlated variables. The laws of distribution of random variables of natural factors were transformed into the conditional normal laws of distribution. The algorithm was tested on the Dnipro cascade of hydropower plants; a numerical value of the probability of an accident on the cascade of hydropower plants was obtained.

Анотація: Запропоновано алгоритм імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд гідровузлів каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності. Ураховано кореляційні зв'язки між природними факторами: кореляційні зв'язки між паводковими витратами водотоку, кореляційні зв'язки між товщиною льоду у водосховищах каскаду гідровузлів, кореляційні зв'язки між температурними впливами

по гідровузлах каскаду. Закони розподілу випадкових величин природних факторів представлено системами випадкових корельованих величин. Здійснено перетворення законів розподілу випадкових величин природних факторів в умовні нормальні закони розподілів. Алгоритм апробовано на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій, отримано чисельне значення імовірності виникнення аварії на каскаді гідроелектростанцій.

Key words: distribution law, natural factors, correlations, cascade of hydropower plants, probabilistic reliability assessment.

Ключові слова: закон розподілу, природні фактори, кореляційний зв'язок, каскад гідроелектростанцій, імовірнісна оцінка надійності.

Постанова проблеми. Важко переоцінити роль гідровузлів Дніпровського каскаду у забезпеченні надійної роботи об'єднаної енергетичної системи України. Підсумкова потужність гідроелектростанцій каскаду складає 3,67 млн. кВт, при цьому виробіток електроенергії становить до 90% виробітку усіх гідроелектростанцій України [1–3]. Водосховища Дніпровського каскаду забезпечують комунально-побутові, промислові і сільськогосподарські потреби більш 50% території України. Тому питання надійної і безпечної експлуатації гідровузлів Дніпровського каскаду, розробка і удосконалення методів оцінки їх надійності являються актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Імовірнісну оцінку надійності гідротехнічних споруд регламентують вітчизняні нормативні документи [4–5], закордонні нормативні документи [6–11]. Зазначені джерела регламентують урахування кореляційного зв'язку між природними факторами під час визначення надійності гідротехнічних споруд.

Статистичне опрацювання природно-кліматичних впливів на території України, моделювання стохастичного характеру природно-кліматичних впливів на гідротехнічні споруди розглянуто в роботах [12–15].

Практичні методики оцінки ризику (імовірності) виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах з урахуванням природно-кліматичних, гідрологічних, сейсмічних впливів, а також недопущення виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах в рамках параметричної теорії надійності розглянуто в роботах [16–27]. Методика оцінки ризику виникнення надзвичайної ситуації на гідровузлі наведено в роботі [16].

Не розв'язано раніше частиною проблеми слід вважати відсутність алгоритму урахування кореляційних залежностей між гідрологічним режимом водотоку, між льодовим режимом водосховищ гідровузлів, між температурними впливами по гідровузлах каскаду при оцінці надійності гідровузлів каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності. Існування кореляційних зв'язків між природними факторами: кореляційні зв'язки між паводковими витратами водотоку, кореляційні зв'язки між товщиною льоду у водосховищах каскаду гідровузлів, кореляційні зв'язки між температурними впливами по гідровузлах каскаду досліджено в роботах [18, 28–29].

Визначення мети та задачі дослідження. Мета і задачі дослідження полягають в розробці ал-

горитму імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд гідровузлів каскадів гідроелектростанцій з урахуванням кореляційних зв'язків між паводковими витратами водотоку, кореляційних зв'язків між товщиною льоду у водосховищах каскаду гідровузлів, кореляційних зв'язків між температурними впливами по гідровузлах каскаду. Здійснити апробацію алгоритму на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій із обчисленням імовірності виникнення аварії.

Матеріали та методика дослідження. Кореляційні зв'язки між випадковими значеннями природних факторів у створах гідровузлів ураховані із залученням нормального закону розподілу для двох корельованих величин в програмному комплексі Mathcad. Перетворення статистичних рядів даних природно-кліматичних впливів в умовні нормальні закони розподілів здійснено методами математичної статистики. Алгоритм імовірнісної оцінки надійності гідротехнічних споруд гідровузлів каскаду гідроелектростанцій побудовано за методом статистичних випробовувань (метод Монте-Карло) в програмному комплексі Mathcad.

Результати дослідження. На підставі усебічного аналізу компоновочних і конструктивних рішень, технічних характеристик гідровузлів Дніпровського каскаду необхідно розробити дерева відмов і пошкоджень основних гідротехнічних споруд гідровузлів, які призводять до виникнення надзвичайної ситуації на гідровузлі, або гіпотетичного сценарію розвитку подій на гідровузлі, які призводять до виникнення надзвичайної ситуації на гідровузлі з метою подальшої оцінки ризику виникнення аварій на гідровузлах Дніпровського каскаду.

Дніпро являється крупнішою річкою України і третьою за величиною у Європі. Площа водозбору Дніпра становить 482 тис. км². Дніпровський каскад гідроелектростанцій складається із шести ступенів: Київський, Канівський, Кременчуцький, Середньодніпровський, Дніпровський (ДніпроГЕС I і ДніпроГЕС II), Каховський гідровузли. Інформація про водосховища Дніпровського каскаду наведена у [2].

Київський гідровузел. До складу споруд гідровузла входять: руслова будівля ГЕС, суміщеного типу із поверхневими водоскидами і спрягаючими стоянами, земляна наливна гребля і лівобережна дамба, судноплавний однокамерний шлюз. Геологічні умови: корінні породи в основі споруд гідровузла представлені дрібнозернистими бучакськими пісками, які підстилаються мергелями. Клас наслідків споруд СС2-1.

Канівський гідровузол. До складу споруд гідровузла входять: руслова будівля ГЕС, суміщеного типу із поверхневими водоскидами, земляна намівна гребля, судноплавний однокамерний шлюз. Геологічні умови: в основі споруд залягають піщані ґрунти. У товщі пісків зустрічаються прошарки старичних супісків і суглинків. Клас наслідків споруд СС2-1.

Кременчуцький гідровузол. До складу споруд гідровузла входять: руслова будівля ГЕС, водозливна гребля, земляні греблі, судноплавний однокамерний шлюз. Геологічні умови: в основі бетонних споруд залягають граніти, земляні греблі розташовані на алювіальних піщаних відкладеннях з прошарками супісків і суглинків, які підстилаються гранітами. Клас наслідків споруд СС3.

Середньодніпровський гідровузол. До складу споруд гідровузла входять: руслова будівля ГЕС, водозливна гребля, земляні греблі, захисна дамба, судноплавний однокамерний шлюз. Геологічні умови: в основі бетонних споруд залягають граніти і граніто-гнейси, земляні греблі розташовані на дрібнозернистих пісках. Клас наслідків споруд СС2-1.

Дніпровський гідровузол. До складу споруд гідровузла входять: пригребельні будівлі ГЕС I і ГЕС II, щитові стінки ГЕС I і ГЕС II, водозливна гребля, спрягаючи споруди, глухі греблі лівого і правого берегів, судноплавні однокамерний і трьохкамерний шлюзи, відкритий розподільчий пристрій. Геологічні умови: в основі споруд залягають граніти. Клас наслідків споруд СС3.

Каховський гідровузол. До складу споруд гідровузла входять: будівля ГЕС суміщеного типу з донними водоскидами, водозливна гребля, земляна гребля, судноплавний однокамерний шлюз, водозабірні споруди Північно-Кримського зрошувального каналу. Геологічні умови: в основі споруд залягають дрібнозернисті піски. Клас наслідків споруд СС3.

Основні передумови на яких побудовано алгоритм визначення ризику виникнення надзвичайної ситуації на каскаді гідровузлів наступні:

- сукупність гідровузлів, що входять до складу каскаду гідроелектростанцій, розглядається як вихідна складна технічна система, яка складається із ряду підсистем першого рівня, кожна із яких моделює один гідровузол, руйнування якого може привести до виникнення надзвичайної ситуації на каскаді гідроелектростанцій;

- сукупність споруд, що входять до складу напірного фронту гідровузла, розглядається як підсистема, яка складається із ряду підсистем другого рівня, кожна із яких моделює одну гідротехнічну споруду, чи конструктивний елемент, руйнування якого приведе до виникнення надзвичайної ситуації на гідровузлі;

- кожна підсистема другого рівня складається з одного чи декількох елементів різних типів, причому кожен з елементів підсистеми відповідає за опір споруди виникненню будь-якого граничного стану;

- ураховуючи логічну схему зв'язків між елементами, які моделюють напірний фронт, вихідна система може відповідати змішаній (послідовно-паралельній) схемі з'єднання елементів;

- слід ураховувати, що деякі елементи, що входять в систему, є однотипними (наприклад елементи, які відповідають за стійкість проти зсуву секцій будівлі гідроелектростанції або бетонної водозливної греблі).

Норми проектування [4–5] регламентують безпеку і надійність гідровузла чи каскаду гідровузлів забезпеченою, якщо забезпечена надійність і безпека кожної гідротехнічної споруди, що входить до складу гідровузла чи каскаду. При цьому оцінка надійності і безпеки кожної гідротехнічної споруди виконується із застосуванням імовірнісних методів на основі сучасної теорії надійності складних технічних об'єктів. У якості показника рівня надійності і безпеки каскаду гідровузлів доцільно використовувати значення ризику виникнення надзвичайної ситуації на каскаді гідровузлів. За надзвичайну ситуацію слід вважати виникнення аварії на будь-якій споруді, що може привести до прориву напірного фронту гідровузла.

Для оцінки ризику виникнення аварії на каскаді гідровузлів використано метод дерев відмов [16, 30]. Основні положення побудови дерева відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій базуються на діючих нормах проектування гідротехнічних споруд та інших джерелах [3–5, 16].

Дерево відмов представляє графоаналітичну модель надійності каскаду гідровузлів, яка розроблена на основі аналізу складу гідротехнічних споруд гідровузлів і характеру імовірнісних зв'язків між ними. Під час побудови дерева відмов спочатку визначають вихідні відмови гідровузлів, які спричиняються відмовами гідротехнічних споруд, настання яких може привести до виникнення результуючої події (випадку) – виникнення надзвичайної ситуації на каскаді гідровузлів. Ієрархічно дерева відмов складаються із головної події (надзвичайна ситуація на каскаді гідровузлів, пов'язана із проривом напірного фронту будь-якого гідровузла), події першого рівня, які безпосередньо ініціюють головну подію (наприклад – руйнування будь-якої споруди гідровузла), події другого рівня, які приводять до спричинення подій першого рівня (наприклад – руйнування будь-якого конструктивного елемента гідротехнічної споруди), базові події. Базові події – найпростіші події, які ініціюють події попереднього рівня. Також дерево відмов містить логічні оператори – чинниково-наслідкові зв'язки між подіями різних рівнів. В даному дослідженні розроблено дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайних ситуацій на гідровузлах Дніпровського каскаду.

Забезпеченість максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду, за даними [16], представляє систему випадкових величин, пов'язаних кореляційними залежностями [28].

Для опису максимальних паводкових витрат застосовано біекспоненціальні розподіли [16]. Але використання системи випадкових величин потребує представлення рядів статистичних даних законом нормального розподілу [31]. При невиконанні гіпотези про нормальність розподілу вихідного статистичного ряду за допомогою існуючих методів [32] вдається таким чином перетворити вихідні дані, що їх розподіл буде підкорятися нормальному закону. Для перетворення вихідного статистичного ряду застосовують підстановки типу $x_{ум} = \lg x$, $x_{ум} = 1/x$, $x_{ум} = 1/x^{1/2}$ або інші, де x – відповідні члени вихідного статистичного ряду, $x_{ум}$ – відповідні члени перетвореного статистичного ряду. В даній роботі застосовано підстановку:

$$Q_{ум,i} = a \times \text{mean}(Q) \left(\frac{Q_i}{\text{mean}(Q)} \right)^b, \quad i = 1 \dots n, \quad (1)$$

де $\text{mean}(Q)$ – середнє значення щорічної максимальної паводкової витрати вихідного статистичного ряду.

Для максимальних паводкових витрат p .

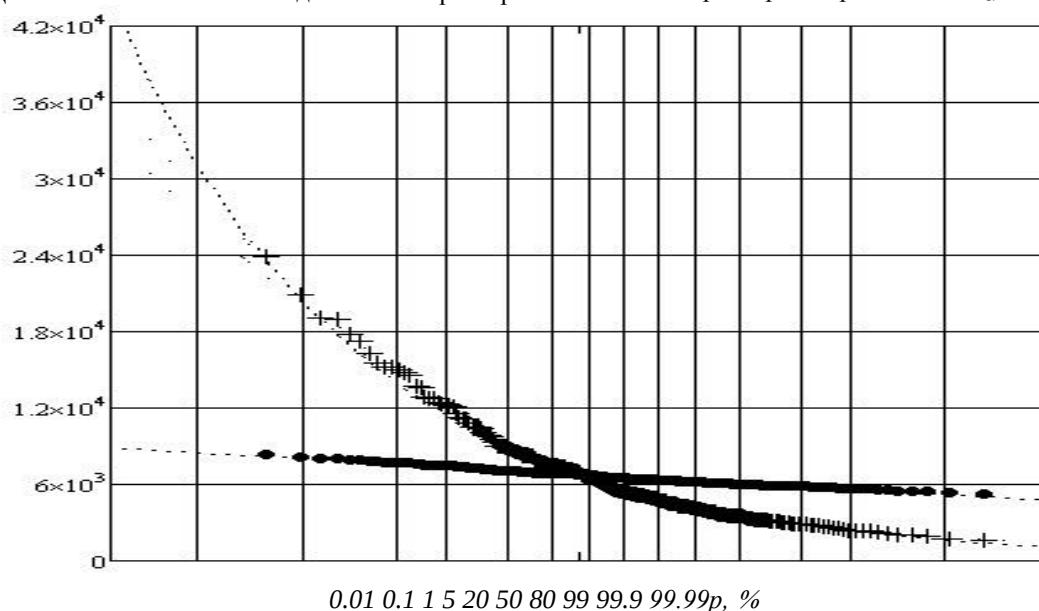


Рис. 1. Криві забезпеченості максимальних витрат води р. Дніпро у пункті спостереження (м. Кремнчук) у координатах Q , $\text{м}^3/\text{с}$ – витрати, p , % – імовірність: + – спостережені витрати, $\text{м}^3/\text{с}$; • – спостережені витрати, перетворені до умовного нормального закону розподілу

Якщо $Q_{1ум}$ і $Q_{2ум}$ – щорічні максимальні паводкові витрати у створах двох гідровузлів, які задані за нормальним законом розподілу як випадкові корельовані величини, то такі корельовані величини підкоряються нормальному закону [31], який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування $m_{Q1ум}$, $m_{Q2ум}$, середньоквадратичні відхилення $\sigma_{Q1ум}$, $\sigma_{Q2ум}$, коефіцієнт кореляції $r_{Q1умQ2ум}$.

Дніпро по пунктах спостережень отримано параметри виразу (1), які наведено в табл. 1 і на рис. 1.

Умовний закон розподілу максимальних паводкових витрат згідно з [33] відповідає нормальному закону, якщо значення виразу (2) знаходиться в межах довірчого інтервалу:

$$\frac{\max(Q_{ум,i}) - \min(Q_{ум,i})}{\sigma(Q_{ум,i})}, \quad (2)$$

де $\max(Q_{ум,i})$ – максимальне значення щорічної паводкової витрати перетвореного нормального розподілу; $\min(Q_{ум,i})$ – мінімальне значення щорічної паводкової витрати перетвореного нормального розподілу; $\sigma(Q_{ум,i})$ – середньоквадратичне відхилення щорічної паводкової витрати перетвореного нормального розподілу.

При кількості членів статистичного ряду $n = 213$ і рівні значущості $p = 10\%$ нижня межа інтервалу 4.93, верхня межа інтервалу 6.18. Чисельні значення виразу (2) для створів гідровузлів наведено в табл. 1, які підтверджують гіпотезу про нормальність перетворених розподілів. Q , $\text{м}^3/\text{с}$

Крім того визначається кореляційний момент $K_{Q1умQ2ум}$ і коефіцієнт варіації C_v . Задається випадкова імовірність максимальних паводкових витрат $p(Q_{1ум})$, розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами $m_{Q1ум}$, $\sigma_{Q1ум}$ визначається квантиль – значення максимальних витрат $Q_{1ум}$ за формулами:

$$m_{Q1умQ2ум} = m_{Q2ум} + r_{Q1умQ2ум} \cdot \frac{\sigma_{Q2ум}}{\sigma_{Q1ум}} \cdot (Q_{1ум} - m_{Q1ум}), \quad (3)$$

$$\sigma_{Q1умQ2ум} = \sigma_{Q2ум} \cdot \sqrt{1 - r_{Q1умQ2ум}^2}. \quad (4)$$

Таблиця 1

Параметри перетворення законів розподілу максимальних паводкових витрат р. Дніпро в умовні нормальні закони розподілу

Найменування	$mean(Q), м^3/с$	a	b	$(max(Q_{ум, i}) - min(Q_{ум, i})) / \sigma(Q_{ум, i})$
Створ Київського гідровузла	$4,69202 \times 10^3$	1,027232	0,25	$4,93 < \mathbf{4,94} < 6,18$
Створ Канівського гідровузла	$6,40782 \times 10^3$	1,0234015	0,19	$4,93 < \mathbf{5,10} < 6,18$
Створ Кременчуцького гідровузла	$6,57347 \times 10^3$	1,021603	0,17	$4,93 < \mathbf{5,06} < 6,18$
Створ Дніпровського гідровузла	$6,69404 \times 10^3$	1,018925	0,14	$4,93 < \mathbf{4,95} < 6,18$

Визначаються параметри умовного закону розподілу $m_{Q_{1ум}Q_{2ум}}, \sigma_{Q_{1ум}Q_{2ум}}$. За відомою імовірністю величини максимальних паводкових витрат $p(Q_{2ум})$, із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини максимальних паводкових витрат $Q_{2ум}$. Здійснюється перерахунок величини максимальних паводкових витрат $Q_{1ум}, Q_{2ум}$, представлених умовним законом розподілу із підстановкою за формулою (1), у дійсні витрати Q_1, Q_2 у створах гідровузлів.

Аналіз статистичних даних максимальної товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду, визначення параметрів функцій розподілу максимальної товщини льоду [13] за статистичними даними дозволили встановити, що імовірності щорічної максимальної товщини льоду

на водосховищах Київського, Канівського і Каховського гідровузлів можливо представити трьохпараметричним гамма-розподілом, на водосховищах Кременчуцького, Середньодніпровського і Дніпровського гідровузлів – біекспоненціальним розподілом. Дослідження кореляційних залежностей між максимальною товщиною льоду за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій здійснене в роботі [18]. Забезпеченість щорічної максимальної товщини льоду у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду, наведених за даними [18], можна представити системою випадкових величин, пов'язаних кореляційними залежностями [31]. Для перетворення вихідних статистичних рядів до нормальних законів розподілів застосовано підстановку:

$$h_{max, ум, i} = a \times mean(h_{max}) \left(\frac{h_{max, i}}{mean(h_{max})} \right)^b, i = 1 \dots n, (5)$$

де $mean(h_{max})$ – середнє значення щорічної максимальної товщини льоду вихідного статистичного ряду.

Для щорічної максимальної товщини льоду

отримано параметри виразу (5) і межі довірчого інтервалу, обчислені за формулою (2), які наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри перетворення законів розподілу максимальних паводкових витрат р. Дніпро в умовні нормальні закони розподілу

Найменування	$mean(h_{max}), см$	a	b	$(max(h_{max, ум, i}) - min(h_{max, ум, i})) / \sigma(h_{max, ум, i})$
Створ Київського гідровузла	54,273	1,03	0,4	$2,84 < \mathbf{2,88} < 3,86$
Створ Канівського гідровузла	44,910	1,01	0,53	$2,84 < \mathbf{2,92} < 3,86$
Створ Кременчуцького гідровузла	41,273	1,04	0,52	$2,84 < \mathbf{2,96} < 3,86$
Створ Середньодніпровського гідровузла	37,455	1,06	0,51	$2,84 < \mathbf{3,50} < 3,86$
Створ Дніпровського гідровузла	34,091	1,02	0,54	$2,84 < \mathbf{3,67} < 3,86$
Створ Каховського гідровузла	28,455	1,09	0,64	$2,84 < \mathbf{3,79} < 3,86$

За допомогою умовних нормальних законів розподілу для двох корельованих величин (аналогічно алгоритму для щорічних максимальних паводкових витрат за формулами (3), (4)) визначаються випадкові величини – дійсні максимальні товщини льоду h_{max1}, h_{max2} у водосховищах пари гідровузлів.

Аналіз статистичних даних максимально низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур по гідровузлах Дніпровського каскаду, а також визначення параметрів функцій розподілу максимально низьких середньомісячних

температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур [14] за статистичними даними дозволили встановити, що імовірності щорічних максимально низьких середньомісячних температур у м. Київ, м. Дніпродзержинськ, м. Запоріжжя, м. Каховка можуть бути представлені нормальним розподілом; у м. Канів – біекспоненціальним розподілом; у м. Кременчук – біекспоненціальним або нормальним розподілами; імовірності щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур у м. Київ, м. Дніпродзержинськ, м. Каховка можуть бути представлені нормальним

розподілом; у м. Канів, м. Кременчук, м. Запоріжжя – логарифмічно-нормальними розподілами.

Дослідження кореляційних залежностей між між максимальними низькими середньомісячними температурами і між максимальними амплітудами середньомісячних температур за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій здійснене в роботі [29].

$$t_{\min, \text{ум}, i} = a \times \text{mean} (t_{\min}) \left(\frac{t_{\min, i}}{\text{mean} (t_{\min})} \right)^b, i = 1 \dots n, \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{ум}, i} = a \times \text{mean} (\Delta t) \left(\frac{\Delta t_i}{\text{mean} (\Delta t)} \right)^b, i = 1 \dots n, \quad (7)$$

де $\text{mean}(t_{\min})$ – середнє значення щорічної максимальної низької середньомісячної температури вихідного статистичного ряду; $\text{mean}(\Delta t)$ – середнє значення щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур вихідного статистичного ряду.

Забезпеченість щорічних максимальних низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур по гідровузлах Дніпровського каскаду, наведених за даними [29], можна представити системою випадкових величин, пов'язаних кореляційними залежностями [31]. Для перетворення вихідних статистичних рядів до нормальних законів розподілів застосовано підстановки:

Для щорічних максимальних низьких середньомісячних температур і максимальних амплітуд середньомісячних температур по гідровузлах Дніпровського каскаду отримано параметри виразів (6–7), які наведено в табл. 3–4. Межі довірчого інтервалу обчислені за формулою (2) і наведені в табл. 3–4.

Таблиця 3

Параметри перетворення законів розподілу щорічної максимальної низької середньомісячної температури $t_{\min}$, °C у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду в умовні нормальні закони розподілу

Найменування	$\text{mean}(t_{\min})$, °C	a	b	$(\max(t_{\min, \text{ум}, i}) - \min(t_{\min, \text{ум}, i})) / \sigma(t_{\min, \text{ум}, i})$
Створ Канівського гідровузла	15,267 (-20)	1,2	0,3	$3,41 < \mathbf{3,92} < 4,52$
Створ Кременчуцького гідровузла	15,45 (-20)	1,25	0,25	$3,41 < \mathbf{4,22} < 4,52$

Таблиця 4

Параметри перетворення законів розподілу щорічної максимальної амплітуди середньомісячних температур Δt , °C у географічних місцях розташування гідровузлів Дніпровського каскаду в умовні нормальні закони розподілу

Найменування	$\text{mean}(\Delta t)$, °C	a	b	$(\max(\Delta t_{\text{ум}, i}) - \min(\Delta t_{\text{ум}, i})) / \sigma(\Delta t_{\text{ум}, i})$
Створ Канівського гідровузла	24,733	1,05	0,15	$3,41 < \mathbf{4,20} < 4,52$
Створ Кременчуцького гідровузла	25,458	1,01	0,25	$3,41 < \mathbf{4,40} < 4,52$
Створ Дніпровського гідровузла	25,975	1,04	0,24	$3,41 < \mathbf{4,21} < 4,52$

За допомогою умовних нормальних законів розподілу для двох корельованих величин (аналогічно алгоритму для щорічних максимальних паводкових витрат за формулами (3), (4)) визначаються випадкові величини – дійсні максимальні низькі середньомісячні температури $t_{\min,1}$, $t_{\min,2}$ у створах пар гідровузлів, а також дійсні щорічні максимальні амплітуди середньомісячних температур Δt_1 , Δt_2 у створах пар гідровузлів.

Для імовірнісної оцінки надійності складних технічних систем доцільно застосовувати принцип слабкої ланки [16]. Принцип слабкої ланки для імовірнісної оцінки надійності Дніпровського каскаду гідроелектростанцій реалізується у наступних положеннях:

1. Для усіх гідротехнічних споруд гідровузлів каскаду розглядається надійність споруд за усіма можливими критеріями настання граничних станів, при досягненні яких можливе виникнення

надзвичайного стану на гідровузлі, пов'язаного із проривом напірного фронту гідровузла. Для гідротехнічних споруд гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій ризики настання граничних станів, обчислені в рамках параметричної теорії надійності.

2. Ризики настання граничних станів гідротехнічних споруд розглядаються в залежності від типу і конструкції споруди, типу основи. Для гідровузлів Дніпровського каскаду гідроелектростанцій розглядаються такі групи гідротехнічних споруд: греблі із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі; бетонні водозливні греблі на нескельовій основі; бетонні водозливні греблі на скельовій основі; будівлі гідроелектростанцій і монтажних майданчиків на нескельовій основі; будівлі гідроелектростанцій і монтажних майданчиків на скельовій основі; голови і камери шлюзів на нескельовій основі; голови і камери шлюзів на скельовій основі; гравітаційні стояни на

нескельовій основі; гравітаційні стояни на скельовій основі.

3. Із перерахованих у п. 2 гідротехнічних споруд можна відокремити однотипні елементи: греблі із ґрунтових матеріалів на нескельовій основі; бетонні споруди на нескельовій основі; бетонні споруди на скельовій основі; залізобетонні

споруди на нескельовій основі; залізобетонні споруди на скельовій основі. Для реалізації алгоритму оцінки надійності каскаду гідроелектростанцій обрано гідротехнічні споруди із максимальним ризиком настання граничного стану за кожним критерієм настання граничного стану, які наведено на рис. 2.

Надзвичайна ситуація на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

Надзвичайна ситуація на Київському гідровузлі:

- стійкість проти зсуву правобережного стояна на нескельовій основі з боку нижнього б'єфа – $p_{розр} = 2.03 \times 10^{-4} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти впливу монтажного майданчика гідроелектростанції на нескельовій основі – $p_{розр} = 1.14 \times 10^{-8} \text{ рік}^{-1}$.

Надзвичайна ситуація на Канівському гідровузлі:

- стійкість верхового і низового укосів греблі із ґрунтових матеріалів: стійкість верхового укосу – $p_{розр} = 1.217 \times 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$, стійкість низового укосу – $p_{розр} = 1.576 \times 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$.

Надзвичайна ситуація на Кременчуцькому гідровузлі:

- стійкість проти перекидання камери шлюзу на скельовій основі і руйнування нижніх воріт шлюзу: стійкість камери шлюзу – $p_{розр} = 1.78 \times 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$;
- руйнування нижніх воріт шлюзу – $p_{розр} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$.

Надзвичайна ситуація на Середньодніпровському гідровузлі:

- перелив води через гребінь греблі із ґрунтових матеріалів – $p_{розр} = 4.46 \times 10^{-4} \text{ рік}^{-1}$;
- фільтраційна міцність тіла греблі із ґрунтових матеріалів – $p_{розр} = 7.63 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- фільтраційна міцність основи греблі із ґрунтових матеріалів – $p_{розр} = 5.32 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- втрата стійкості плит кріплення верхового укосу греблі із ґрунтових матеріалів при вибиваючій дії примерзлого льоду – $p_{розр} = 6.13 \times 10^{-18} \text{ рік}^{-1}$;
- механічна міцність камери шлюзу на нескельовій основі і руйнування нижніх воріт шлюзу: стійкість камери шлюзу – $p_{розр} = 5.327 \times 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$;
- руйнування нижніх воріт шлюзу – $p_{розр} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$.
- механічна міцність будівлі гідроелектростанції – $p_{розр} = 5.32 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти зсуву монтажного майданчика будівлі гідроелектростанції – $p_{розр} = 4.84 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- механічна міцність основи монтажного майданчика будівлі гідроелектростанції – $p_{розр} = 8.22 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$.

Надзвичайна ситуація на Дніпровському гідровузлі:

- механічна міцність тіла водозливної бетонної греблі на скельовій основі гідроелектростанції I – $p_{розр} = 1.02 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти зсуву водозливної бетонної греблі на скельовій основі гідроелектростанції I – $p_{розр} = 1.51 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$;
- стійкість проти перекидання водозливної бетонної греблі на скельовій основі гідроелектростанції I – $p_{розр} = 2.44 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$;
- механічна міцність скельової основи водозливної бетонної греблі

гідроелектростанції I – $p_{розр} = 5.69 \times 10^{-8} \text{ рік}^{-1}$;

- відмова затворів водозливу водозливної бетонної греблі

гідроелектростанції I – $p_{розр} = 6.0 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$;

- стійкість проти спливання камери шлюзу на скельовій основі і руйнування нижніх воріт шлюзу: стійкість камери шлюзу – $p_{розр} = 9.60 \times 10^{-7} \text{ рік}^{-1}$;

руйнування нижніх воріт шлюзу – $p_{розр} = 2.0 \times 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$.

Надзвичайна ситуація на Каховському гідровузлі:

- фільтраційна міцність нескельової основи будівлі

гідроелектростанції – $p_{розр} = 7.22 \times 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$.

Рис. 2. Блок-схема підсистем розрахункового дерева відмов і несправностей Дніпровського каскаду гідроелектростанцій

Навколовершинні події і стани дерева відмов і несправностей на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій представлено на рис. 3.

Після виконання усіх N випробовувань обчислюється значення узагальненого ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій P_{us} . Значення ризику P_{us} визначається відношенням кількості випробовувань N_1 , при яких відбувається настання хоча б одного із граничних станів, до загальної кількості випробовувань N . Для

досягнення необхідної точності значення P_{us} проведено 9×10^6 статистичних випробовувань. Отримано розрахункове значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій, яке дорівнює $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4} \text{ 1/рік}$. Обчислено 95% довірчий інтервал для значення імовірності виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

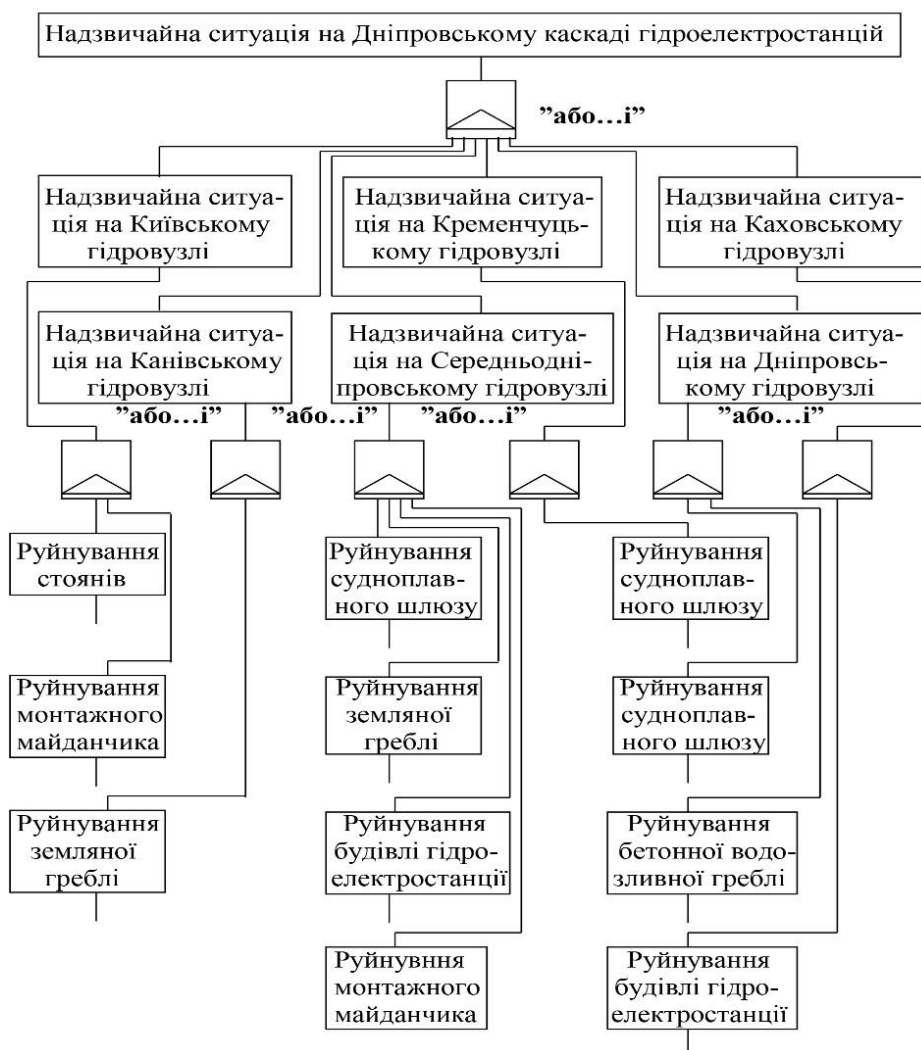


Рис. 3. Навколовершинні події і стани дерева відмов і несправностей, які приводять до виникнення надзвичайної ситуації на

Дніпровському каскаді гідроелектростанцій

Висновки і пропозиції. Розроблено алгоритм імовірнісної оцінки надійності каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності. Запропонований алгоритм урахує кореляційні зв'язки між гідрологічним режимом водотоку, кореляційні зв'язки між льодовим режимом водосховищ гідровузлів, кореляційні зв'язки між температурними впливами по гідровузлах каскаду. Результати імовірнісної оцінки надійності Дніпровського каскаду гідроелектростанцій в рамках системної теорії надійності свідчать, що значення ризику виникнення надзвичайного стану на Дніпровському каскаді гідроелектростанцій дорівнює $P_{us} = 4.7 \times 10^{-4}$ 1/рік. Результати дослідження можуть застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідроелектростанцій.

Список літератури:

1. Ландау Ю., Сиренко Л. Гидроэнергетика и окружающая среда. Киев : Либра, 2004. 484 с.
2. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду / А. В. Яцик та ін. Київ : Генеза, 2003. 176 с.
3. Романчук К. Г., Стефанишин Д. В. Сценарний підхід та метод Байєса для оцінювання ризиків системних аварій на гідровузлах. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2016. № 2. С. 116–123.
4. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. [Чинний від 2009-12-01]. Київ : ДП "Укрархбудінформ", 2009. 30 с. (Державні будівельні норми України).
5. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення. [Чинний від 2011-01-01]. Київ : ДП "Укрархбудінформ", 2010. 37 с. (Державні будівельні норми України).
6. *Arbeitshilfe zur DIN 19700 für hochwasser-rückhaltebecken* / Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz. Baden-Württemberg : JVA Mannheim @ Druckerei, 2007. 143 p. (Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz).
7. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower : Chapter 1. Washington : FERC, 2016. 77 p. (Federal energy regulatory commission, Division of dam safety and inspections).
8. Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incident and Failures : First Edition. FEMA P-946. Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2013. 145 p.
9. JCSS Probabilistic model code. Part 1. Basis of design. JCSS working materials. JCSS. 2000. 62 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch> (дата звернення: 12.05.2017).
10. JCSS Probabilistic model code. Part 2. Load models. JCSS working materials. JCSS. 2001. 73 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch> (дата звернення: 12.05.2017).
11. JCSS Probabilistic model code. Part 3. Material properties resistance models. Memorandum. JCSS.

2000. 41 p. URL: <http://www.jcss.ethz.ch> (дата звернення: 12.05.2017).

12. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу вітрових впливів за статистичними даними. *Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, 2011. Вип. 127. С. 171–175.

13. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних товщини льоду на водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду і вибір параметрів функції розподілу максимальної товщини льоду за статистичними даними. *Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб.* Київ: Техніка, 2011. Вип. 101. С. 123–127.

14. Мозговий А. О. Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу температурних впливів за статистичними даними. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2011. Вип. 1 (53). С. 119–126.

15. Стефанишин Д. В. Выбор аналитических кривых обеспеченностей максимальных гидрологических характеристик с учетом риска. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2006. Т. 245. С. 51–59.

16. Вайнберг А. И. Влияние природных факторов на надежность и безопасность гидротехнических сооружений: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Харьковский национальный университет строительства и архитектуры. Харьков, 2008. 349 с.

17. Векслер А. Б., Ивашинцев Д. А., Стефанишин Д. В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. С. – Петербург : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. 589 с.

18. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальної товщини льоду за статистичними даними спостережень у водосховищах гідровузлів Дніпровського каскаду. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2018. Т. 93, №3. С. 149–155.

19. Mozgovy A. O., Butnik S. V. Probable reliability prediction of the dam constructed by ground materials of the hydraulic power system Nam Chien in Vietnam using Monte-Carlo method. *Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings* : 7th International Scientific Conference. Transbud-2018. MATEC Web of Conferences, November 14-16, 2018. Kharkiv, Ukraine, 2018. Volume 230, 02019 (2018). P. 1–7.

20. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків, 2018. Вип. 181. С. 81–91.

21. Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гребель із ґрунтових матеріалів за критерієм

стійкості укосів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць*. Одеса, 2018. Вип. 73. С. 113–126.

22. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: methodology and quantification / O. Morales-Nápoles and others. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2014. Vol. 10. Issue 5. P. 589–603.

23. Krounis A. Sliding stability re-assessment of concrete dams with bonded concrete-rock interfaces : doctoral thesis. Sweden : Stockholm, 2016. 97 p.

24. Lupoi A., Callari C. A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2012. Vol. 8. Issue 10. P. 985–998.

25. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis / L. Altarejos-García and others. *Structural Safety*. 2012. Vol. 36–37. P. 1–13.

26. Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods—application to hazards studies / L. Peyras and others. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2012. Vol. 16. Issue 7. P. 795–817.

27. Westberg M., Johansson F. Sannolikhetsbaserad bedömning av betongdammars stabilitet.

Bakgrundsbeskrivning till framtägnande av "Probabilistic model code for concrete dams". Sweden : Energiforsk, 2016. 50 p.

28. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2011. Вип. 65. С. 364–370.

29. Мозговий А. О. Дослідження кореляційної залежності температурних впливів за статистичними даними по гідровузлах Дніпровського каскаду. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Збірник наукових праць*. Одеса, 2018. Вип. 72. С. 135–145.

30. Стефанишин Д. В. Расчет деревьев отказов для грунтовых плотин с учетом стохастических связей между событиями. *Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 1993. Т. 227. С. 38–46.

31. Вентцель Е.С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. 5-е изд. стер. Москва : Высш. шк., 1998. 576 с.

32. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. Москва : Высшая школа, 1988. 239 с.

33. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем. В. Н. Варыгин. Москва : Статистика, 1976. 598 с.

Тяпин А.А.

Postgraduate student, Siberian Federal University,
Svobodny prospect, 79, Krasnoyarsk, Russia, 660041

Kinev E.S.

Candidate of technical sciences, Director Thermal Electric Systems LLC,
Chernyshevsky St., 104, off. 85, Krasnoyarsk, Russia, 660043

TOPOLOGICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF ELECTROMAGNETIC ASYMMETRY OF THE MHD MACHINE

Тяпин Алексей Андреевич

Аспирант,

ФГАОУ ВО Сибирский Федеральный Университет,
Свободный проспект, 79, Красноярск, Россия, 660041

Кинев Евгений Сергеевич

К.т.н., директор

ООО Тепловые электрические системы
Чернышевского, 104, офис 85, Красноярск, Россия, 660043

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НЕСИММЕТРИИ МГД-МАШИНЫ

Abstract. The approach to the analysis of electromagnetic asymmetry of multiphase induction MHD machines designed for stirring aluminum melt in furnaces is considered. Technological equipment for stirring aluminum is created taking into account the modes of the power supply system, ensuring the specified character of the electromagnetic field of linear induction machines. The use of high-power transistor frequency converters ensures acceptable reliability and flexibility of the power supply system. The shortened three-phase MHD machines of the longitudinal magnetic field are characterized by the presence of an open magnetic circuit, therefore, the low-frequency inverter mode turns out to be asymmetric. When designing inductors, it is important at the initial stage to evaluate the distribution of currents and the nature of the interaction of the windings, taking into account the transfer of power between the phases. For the most common three-zone and four-zone inductors, the asymmetry of the currents in the windings can be very significant. This leads to a distortion of the running magnetic mole and reduces the integral traction force of the induction machine. The evaluation of the asymmetry of the inductors of

the longitudinal magnetic field for different winding switching circuits can be performed using topological equations.

Аннотация. Рассмотрен подход к анализу электромагнитной несимметрии многофазных индукционных МГД-машин, предназначенных для перемешивания расплава алюминия в печах. Технологическое оборудование для перемешивания алюминия создают с учетом и режимов системы электроснабжения, обеспечивающей заданный характер электромагнитного поля линейных индукционных машин. Приемлемую надежность и гибкость системы электропитания обеспечивает использование мощных транзисторных частотных преобразователей. Для укороченных трёхфазных МГД-машин продольного магнитного поля характерно наличие разомкнутого магнитопровода, поэтому режим низкочастотного инвертора оказывается несимметричным. При разработке индукторов важно уже на первоначальном этапе оценить распределение токов и характер взаимодействия обмоток, с учетом переноса мощности между фазами. Для наиболее распространенных трёхзонных и четырёхзонных индукторов несимметрия токов в обмотках может оказаться весьма существенной. Это приводит к искажению бегущего магнитного поля и снижает интегральное тяговое усилие индукционной машины. Оценку несимметрии режима индукторов продольного магнитного поля для разных схем включения обмоток можно выполнять с применением топологических уравнений.

Keywords: *Asymmetry of the three-phase MHD machine, electromagnetic inductor, running magnetic field, electromagnetic stirrer, power supply system, symmetric component method, negative-sequence replacement circuit, frequency inverter.*

Ключевые слова: *Несимметрия трёхфазной МГД-машины, электромагнитный индуктор, бегущее магнитное поле, электромагнитный перемешиватель, система электроснабжения, метод симметричных составляющих, схема замещения обратной последовательности, частотный инвертор.*

Formulation of the problem. In the power supply system of linear induction machines for stirring molten aluminum, low-frequency multiphase converters with a modified sinusoidal voltage are used. Transistor converters PWM for electromagnetic stirrers [1, p. 65] operate at voltages up to 1000 V at a power of less than 1000 kVA. The currents of a multiphase frequency converter 250–400 amperes are asymmetric and reactive in nature [2]. To create a running magnetic field in a melt, short-pole two-three-phase linear asynchronous motors with an open magnetic core are used [3]. The peculiarity of such machines is their small polarity under the condition $2p \leq 2$. Preliminary calculation of the electromagnetic mode of short-polar induction machines is performed approximately, according to engineering methods, and then perform numerical simulation on a computer. Often the results of numerical simulation are significantly different from the parameters laid down in the design. This is especially true for the sharp asymmetry of the currents in the phases, which leads to a shift in the magnetic poles of the inductor of the longitudinal magnetic field and to a deterioration of the traction characteristics [4]. The application of the method of symmetric components makes it possible to estimate the nature of the asymmetry of the currents of the induction machine and to propose measures for correcting the regime.

The specificity of the design of short-pole induction machines determines the asymmetric mode of the inductor power supply system [5]. When designing induction machines, it is difficult to fully estimate the distribution of currents, taking into account the mutual inductance of the phases and the transfer of power between closely spaced windings of the inductor [6]. In addition, when developing a frequency converter for an induction machine, during the construction of a transistor inverter and creating control algorithms for a power module, it is necessary to provide all possible modes of operation [2].

Solution. For stirring aluminum melt to using inductors of a longitudinal or transverse magnetic field. The indicated magnetohydrodynamic (MHD) devices are distinguished by different efficiency and cost [7]. For small-capacity furnaces, it is advantageous to use shortened inductors of a longitudinal running field, which are distinguished by simplicity and low cost. In the composition of each MHD stirrer, in addition to the inductor, a low-frequency multi-phase converter is used [8]. For induction MHD machines of three-, four- and six-zonal construction, three-phase inverters are used.

The most significant mode feature of the power system of the inductor of a longitudinal magnetic field can be considered a radical change in the phase relationships between voltages and currents in the phases of the inverter [9]. Inverse inclusion of the induction machine windings [10], current asymmetry, power transfer between the windings, can lead not only to a change in the reactivity character from the inductive to the capacitive, but also to the mutation of the mode at which the inverter becomes an electric receiver. This phenomenon is preferably investigated at the stage of analysis of the circuit configuration of the "inductor-inverter" module [11]. This allows us to estimate the limits of the change in the performance characteristics and formulate the requirements for the construction of an algorithm for the operation of electronic components in the control system for pulsed power switches [12]. The fact is that the currents of the steady-state regime of different phases can differ by a factor of two, so the maximum permissible operating parameters of IGBT-transistors, especially taking into account impulse overloads, should be chosen reasonably [8].

In the algorithm of the PWM controller, states should be provided in which the instantaneous current in the inductor winding is in antiphase with the voltage of the half bridge module for a long time. In the power supply system of the induction machine, large reactive

powers circulate, since the inductor mode is close to idling. The lack of rotation in induction machines also creates the features of electronic control during an emergency stop [12]. The algorithm for controlling electronic units provides for an instantaneous reset of reactive power to the ballast in emergency shutdown mode.

The circuit of the power module of the frequency inverter based on three half-bridges (D1, D2, D3) is

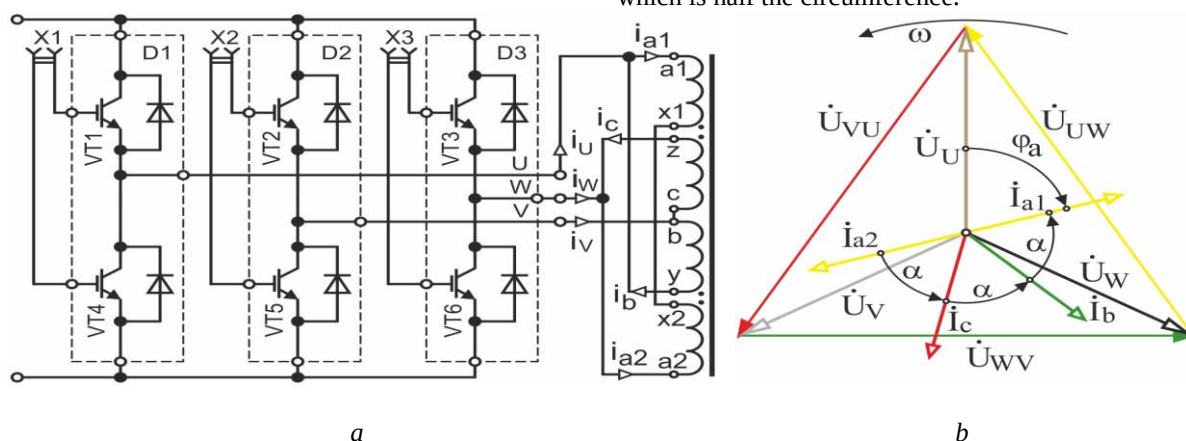


Figure 1

Judging by the vector diagram (Fig. 1, b), it is easy to confirm that the phase shift of the magnetic makes an angle $\alpha = \pi/6$, which is more advantageous to have within such a small pole division. At the same time, an

inductor with such a connection scheme becomes a four-zone one and can turn out to be somewhat larger, which should be constructively limited in the design.

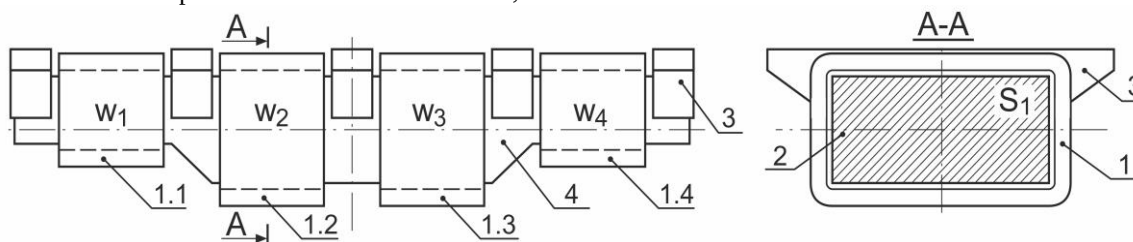


Figure 2

The next step should be to highlight the features of connecting the induction machine to the frequency converter and formulate the basic requirements for the power supply mode of the windings. First of all, this refers to the ratio of the phase angles of the currents, which provide a given alternation of the poles of the magnetic field. To estimate the nature of the distribution of currents in the linear wires of the power supply, one can write down a system of equations according to Kirchhoff's laws. At the initial stage, taking into account the open nature of the magnetic circuit, the magnetic bonds between the phases should be neglected

$$\begin{aligned} \dot{I}_U + \dot{I}_b - \dot{I}_{a1} &= 0, \dot{I}_U = \dot{I}_{a1} - \dot{I}_b, \\ \dot{I}_W + \dot{I}_c - \dot{I}_{a2} &= 0, \dot{I}_W = \dot{I}_{a2} - \dot{I}_c, \\ \dot{I}_V - \dot{I}_c - \dot{I}_b &= 0, \dot{I}_V = \dot{I}_c + \dot{I}_b. \end{aligned} \quad (1)$$

According to the system of equations (1) for the steady-state regimes of a three-phase inductor of a longitudinal magnetic field, a vector current diagram is constructed in Fig. 3, a. An approximate solution is performed for the first harmonic, without taking into account the saturation of the steel, when connecting the windings of a linear induction machine in the reverse order of the phase sequence. The resulting current distribution indicates an extremely significant asymmetry of the three-phase inverter mode. Judging by the vector diagram, the sum of the currents of the first and third phases I_U and I_W is equal to the current of the second phase I_V , provided that the phase angles $\alpha \approx 2\pi/3$ are approximately equal.

Thus, in a simple example of analysis, important information can be obtained for the design of a frequency converter, the power link of which must allow continuous operation with asymmetry of this kind, and the electronic components must be rated for electrical overload at 1.73 times the nominal value. In this case, the inverter protection system must understand the

asymmetric current distribution in the adaptive mode. Even more important is the recognition of the asymmetry of the currents of the frequency converter taking

into account the magnetic bonds between the windings of the inductor and the saturation of the steel.

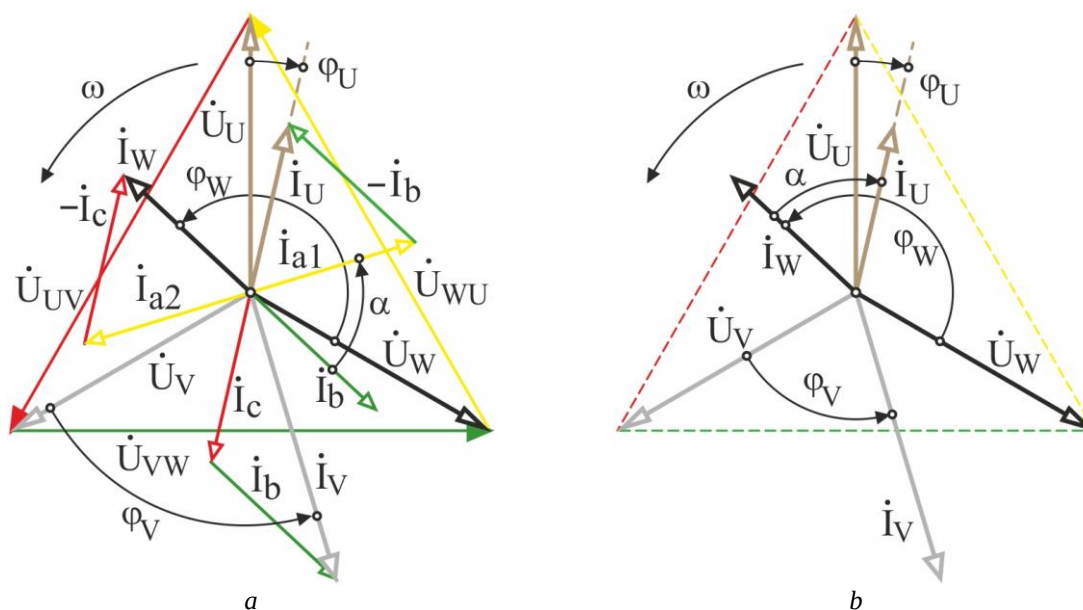


Figure 3

It can be noticed, however, that in this case, the open configuration of the magnetic circuit largely attenuates the distortion of the currents [4]. Nevertheless, the close arrangement of the windings of neighboring phases, within one pole division, can further aggravate the asymmetry of the currents within the range of 25-30 %.

From the vector diagram of voltages and currents, it is possible to estimate the presence of power transfer between adjacent phases, for this it is necessary to represent the same-named quantities on the complex plane and indicate the corresponding phase angles between currents and voltages, as shown in Fig. 3, b. Judging by the nature of the angles, it can be concluded that only in the first phase the current lags behind the voltage by the angle ϕ_V , which corresponds to the inductive nature of the load, and the phase of the inverter retains the status of the generator. In phase V, the angle between the current and voltage ϕ_W only slightly does not reach 90° , and the current is ahead of the voltage, which indicates the capacitive nature of the load. As for the third phase, the voltage and current are fixed in the mode close to antiphase. In this case, the phase shift ϕ_U only slightly does not reach the value of π , which indicates the transfer of power, and the phase of the inverter acquired the character of an electrical receiver. The obtained results should be considered when building control algorithms for pulsed power switches of a low-frequency inverter.

Asymmetric phase modes in power supply systems of electrical installations are often investigated using the method of symmetric components. For example, in currents of an induction machine of a longitudinal magnetic field, for different schemes of winding inclusion, it is possible to calculate the components of direct, reciprocal and zero sequence

$$\dot{I}_0 = (\dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W)/3,$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= (\dot{I}_U + a \cdot \dot{I}_V + a^2 \cdot \dot{I}_W)/3, \\ \dot{I}_2 &= (\dot{I}_U + a^2 \cdot \dot{I}_V + a \cdot \dot{I}_W)/3. \end{aligned} \quad (2)$$

The resulting currents in the phases of the transistor inverter are determined by mutual relations, which are used to estimate the regime in the set of complex circuits for replacing the power supply system of the induction machine

$$\begin{aligned} \dot{I}_U &= (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0), \\ \dot{I}_V &= a^2 \cdot \dot{I}_1 + a \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0, \\ \dot{I}_W &= a \cdot \dot{I}_1 + a^2 \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Taking into account the nature of the asymmetry of the currents, we can apply the method of symmetric components to the three-phase system of vectors and obtain the corresponding schemes for substituting the direct and reverse sequences. It should be noted that, since the inclusion of the windings of the induction machine shown in the diagram (Fig. 1, a), even during splitting, keeps the connection in a triangle, there will be no zero sequence components in the currents. And this simplifies the construction of an equivalent vector diagram. When choosing a coordinate system for the symmetric component method, you can bind the phase voltage vector U_V to zero. Then the idealized system of asymmetric current vectors (Fig. 4, a) can be represented in the following form:

$$\begin{aligned}\dot{I}_V &= I_V \cdot e^{j\varphi}, \quad \dot{I}_W = I_W \cdot e^{j(\varphi - \pi/2 - \alpha)}, \\ \dot{I}_U &= I_U \cdot e^{j(\varphi + \pi/2 + \alpha)}.\end{aligned}$$

By the formulas of symmetrical components, the values of the currents of the direct and reverse sequence can be calculated (Fig. 4, a), provided $\dot{I}_0 = 0$. It should be noted that for the reverse sequence a significant current is calculated, equal to half the current of the direct sequence $I_2 = I_1/2$.

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \frac{(I_V e^{j\varphi} + a \cdot I_W e^{j(\varphi - \frac{2\pi}{3})} + a^2 \cdot I_U e^{j(\varphi + \frac{2\pi}{3})})}{3} = I_1 e^{j\varphi_1}, \\ \dot{I}_2 &= \frac{(I_V e^{j\varphi} + a^2 \cdot I_W e^{j(\varphi - \frac{2\pi}{3})} + a \cdot I_U e^{j(\varphi + \frac{2\pi}{3})})}{3} = I_2 e^{j\varphi_2},\end{aligned}$$

This confirms the high degree of distortion of the symmetry of the system of currents, as shown in Figure 4. Since it was possible to calculate the symmetrical

components of the currents for the inductors of the longitudinal field, it is then easy to proceed to the construction of replacement schemes for the induction machine for the forward and reverse sequences. At the same time, in analyzing the regime of the power supply system, one can traditionally leave from the study of an asymmetric regime and calculate both for a symmetric state.

However, this calculation should be regarded as approximate, since the saturation of the steel of the magnetic circuit was not initially taken into account. Nevertheless, with the application of such an approach, it is not at all difficult to obtain an idea of the nature of the currents in the phases. And already at the next stage of calculation it is possible to pass to the estimation of the regime parameters taking into account the saturation of the core. Moreover, based on the results of the calculation, for example, using the harmonic balance method and subsequent spectral analysis, the odd harmonics of currents and voltages can also be grouped by indices and correlated with a direct or reverse sequence. This will cause the vector diagrams of the symmetrical components to be corrected and to obtain refined values of the currents and voltages of the inverter.

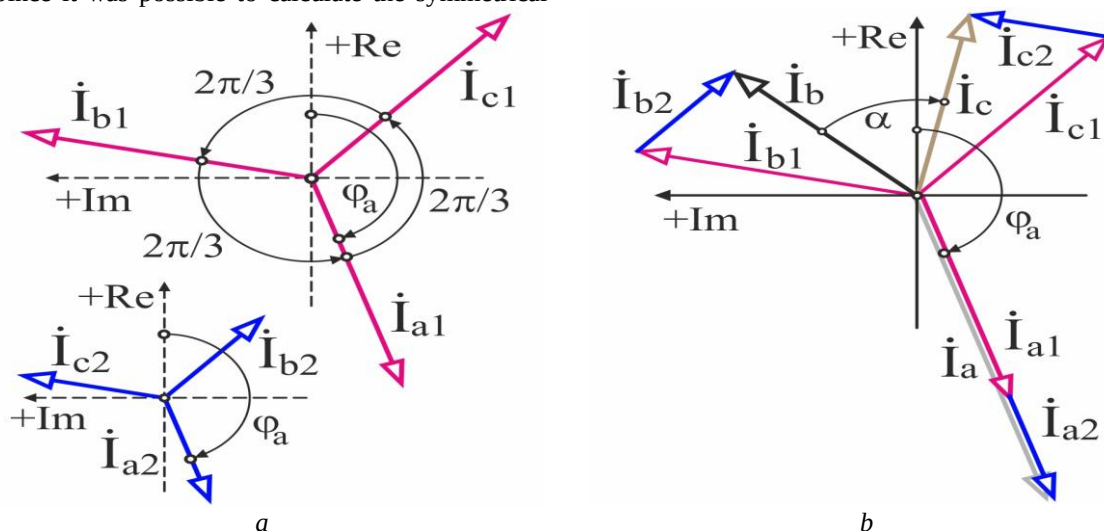
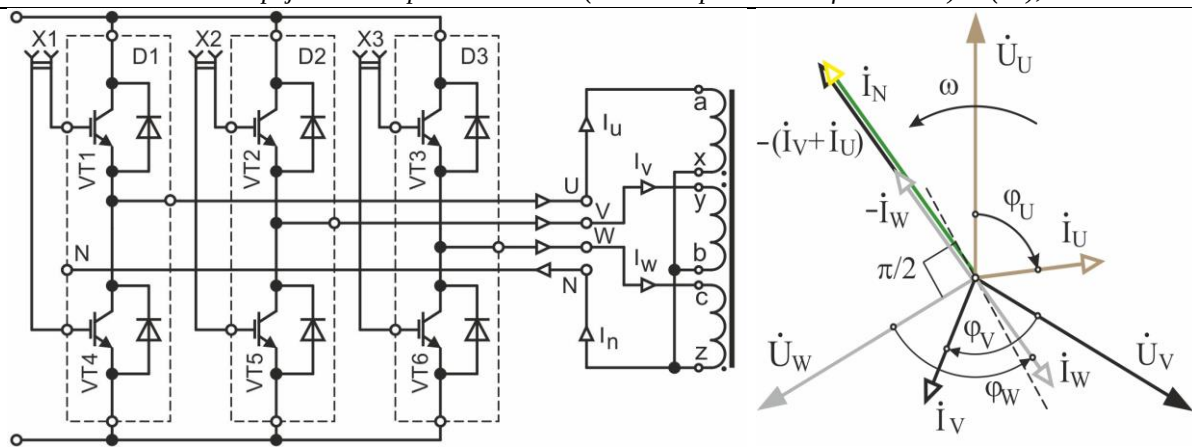


Figure 4

It is noteworthy that for the classical layout of a three-zone induction machine (Figure 5, a) and the inclusion of windings with a star with an inversion of the middle phase, by analogy with a triangle, the symmetric component method can also be applied. Given the phase angles, the currents in the side phases remain inductive, since the phase angles $\varphi_U > 0$ and $\varphi_V > 0$. And since the current of the inverted mean phase ($\varphi_W < 0$)

outstrips the voltage by an angle greater than $\pi/2$, then two consequences arise. First, the reactivity of the medium phase current acquires a capacitive character, and secondly, the nature of the generation changes. According to the vector diagram, the inversion of the current of the middle phase leads to a power transfer, and the third phase of the inverter essentially becomes an electric receiver.



It is noteworthy that the current in the neutral of a linear induction machine is equal to twice the nominal phase current of the inverter, and the modules of currents in the phases of the induction machine are equal to each other. Taking into account the magnetic connection between the windings, the vector diagram will be significantly distorted, which should be taken into account when selecting components. To the idealized distribution of currents shown in the diagram, we also apply the method of symmetric components. To obtain symmetrical components, the phase currents should be written in complex form and the system of equations (2) applied. You can perform calculations manually or use a computing environment, such as Mathcad.

The symmetrical current components calculated from expressions (2) are shown in Fig. 6, a. The modules of currents of the reverse and zero sequences are equal to each other and three times higher than the current of the direct sequence $I_0 = I_2 = 3 I_1$. The proportions of the module of the symmetrical components reflect such a sharp character of the asymmetry. Using the calculated vectors, expression (3) creates an equivalent vector diagram, as shown in Fig. 6, b. The current of each phase is determined by analytical or graphical summation of the symmetric components using the rotation operator a .

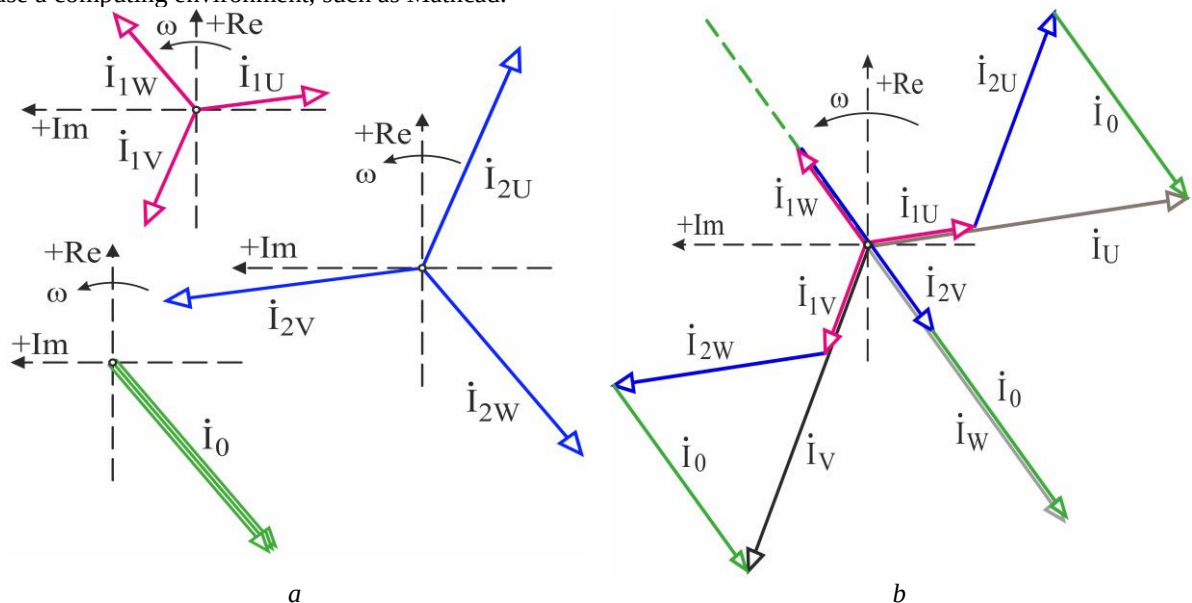


Figure 6

It is noteworthy that from the values of the symmetric components it is easy to understand that the current in the neutral wire can be considered as a set of zero-sequence currents of all phases. In addition to the vector diagram shown in Fig. 6, b, according to Kirchhoff's law, it is possible to obtain the current vector in the inductor neutral as the sum of the currents of all phases. The specific characteristics of the device in question as a complex for stirring a melt containing a multiphase induction machine and a multiphase inverter allow us to use, in addition to traditional methods

of analysis, modern computational tools oriented to the application of algorithms of applied mathematics. To calculate the electromagnetic modes of asymmetrical three-phase systems, it is often more convenient to use specialized software, for example, Ansys Multiphysics [9].

However, the construction of a full-scale model of the EMS complex does not exclude a preliminary analysis of the power supply mode according to the scheme for including the inductors of the longitudinal magnetic

field. Good results of the analysis of the traveling magnetic field distribution are provided by the CFX and Fluent subsystem, which allows not only to simulate the power supply system, but also a low-pole induction machine with aluminum melt in a full-phase representation [10]. It is at the modeling stage that the solution of the problem of accounting for asymmetric modes in the power supply system is achieved. To do this, the parameters of the model specify not only the nature of the currents, but also the parameters of the mutual inductance. They are determined through the coupling coefficient of the coils of the inductor of the longitudinal magnetic field. In addition, when constructing a numerical model, the nonlinear character of inductive coupling is taken into account. To do this, the real magnetic characteristics of the steel core are determined and the degree of saturation of the teeth and magnetic circuit in the steady state.

It should be noted that the interface of the software environment Ansys allows you to create mathematical models of enormous size, consisting of modules that work in different subsystems. In this case, it is far from always rational to create hybrid models that take into account the features of the temperature and magnetic fields of the inductor in conjunction with the electromagnetic regimes of the power supply system. In most cases, the calculation and simulation of the regime of the power supply system can be separated from the simulation of the electromagnetic mode of the inductor. But at the same time, it is always necessary to introduce the corresponding boundary conditions, allowing to combine the results obtained at the borders of the regions, based on the parameters of the nominal power supply mode.

Conclusions. Induction MHD machines of a longitudinal magnetic field, intended for stirring melts, are distinguished by the asymmetry of the electromagnetic mode. To correct the distribution of currents that create a traveling magnetic field, a preliminary analysis is applied using topological equations and the subsequent regulation of the linear current load of the inductor. The required value of the magnetizing force of windings of each phase is clarified by the adjustment characteristics at the stage of modeling the electromagnetic field and power circuits of the MHD machine. In addition, software-algorithmic regulation of the amplitude-phase operating parameters of the inverter is used to adjust the characteristics of the induction MHD machine, which allows aligning the distribution of traction in the melt. With any distribution of currents in the windings, the use of analysis of the regimes by topological equations allows us to formulate a set of requirements for developing algorithms for controlling the power switches of frequency converters and building a special series of metallurgical inverters. Among the requirements can be identified greater resistance to overload with an extremely low power factor and immunity to asymmetry in phases when working on the edge of the frequency range.

References

1. Tyapin, A. A. Inductors for electromagnetic stirrers // *Znanstvena Misel Journal / Global Science Center LP, Ljubljana*, №19-1, 2018. – p. 64-67.
2. Tyapin, A. A. The structure of electromagnetic stirrers // *Znanstvena Misel Journal / Global Science Center LP, Ljubljana*, №20-1, 2018. – p. 50-57.
3. Vol'dek, A. I. Indukcionnye MGD-mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom. – L.: EHnergiya, 1970. – 272s.
4. Vol'dek, A. I. Iskazhenie simmetrii napryazhenij i tokov v indukcionnyh mashinah s razomknutym magnitoprovodom. *Izvestiya vuzov, Elektromekhanika*, 1960. № 5. – s. 78.
5. Mishchenko, V. D. Tekhnologiya ehlektromagnitnogo transportirovaniya legkih splavov / V. D. Mishchenko, A. EH. Mikel'son, YU. K. Krumin'. – M.: Metallurgiya, 1980. – 128 s.
6. Krumin', YU. K. Osnovy teorii i rascheta ustroystv s begushchim magnitnym polem. – Riga: Zinatne, 1983. – 278 s.
7. Baranov, G. A. Raschet i proektirovanie indukcionnyh MGD-mashin s zhidkometallicheskim rabochim telom / G. A. Baranov, V. A. Gluhii i dr. – M.: Atomizdat, 1978. – 248s.
8. Golovenko, E. A. Tekhnologiya ehlektromagnitnogo vozdejstviya na rasplav alyuminiya v mikserah i pechah / E. A. Golovenko, V. A. Goremykin, E. S. Kinev i dr. // *Cvetnye metally*. – 2014. № 2 (854). S. 86-92.
9. Tyapin, A. A. Ocenka glubiny proniknoveniya ehlektromagnitnoj volny v rasplavlennyy alyuminij / Innovacionnye nauchnye issledovaniya: teoriya, metodologiya, praktika: sbornik statej XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii // A. A. Tyapin, V. YU. Andryushchenko, V. A. Goremykin, E. S. Kinev. – Penza: MCNS «Nauka i Prosveshchenie». – 2018. S. 27-34.
10. Tyapin, A. A. Gidrodinamika raspredelenno poly skorostej rasplava alyuminiya / A. A. Tyapin, V. YU. Andryushchenko, V. A. Goremykin // *Metody prognozirovaniya v tekhnike i tekhnologiyah. Sbornik statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Perm', 28 sentyabrya 2018)*. – Sterlitamak: AMI, 2018. – S. 75-85.
11. Mycyk, G. S. Trekhfaznye inventory napryazheniya, nechuvstvitel'nye k nesimmetrii nagruzki / G. S. Mycyk, Hlaing Min U. – M.: Vestnik MEI. № 4. 2016. – s.62-68.
12. P'yu M'int Thejn. Sozdanie informacionno-metodicheskogo obespecheniya dlya sistemnogo proektirovaniya staticheskikh preobrazovatelej chastoty v sostave mashinno-ehlektronnykh generiruyushchikh sistem dlya maloj ehnergetiki i avtonomnykh ob'ektov: Avtoref. dis. ... k.t.n. M.: NIU «MEI», 2013. – 20 s.

Список использованных источников

1. Tyapin, A.A. Inductors for electromagnetic stirrers // Znanstvena Misel Journal / Global Science Center LP, Ljubljana, №19-1, 2018. – p. 64-67.
2. Tyapin, A.A. The structure of electromagnetic stirrers // Znanstvena Misel Journal / Global Science Center LP, Ljubljana, №20-1, 2018. – p. 50-57.
3. Вольдек, А.И. Индукционные МГД-машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272с.
4. Вольдек, А.И. Искажение симметрии напряжений и токов в индукционных машинах с разомкнутым магнитопроводом. Известия вузов, Электромеханика, 1960. № 5. – с. 78.
5. Мищенко, В. Д. Технология электромагнитного транспортирования легких сплавов / В. Д. Мищенко, А. Э. Микельсон, Ю. К. Круминь. – М.: Металлургия, 1980. – 128 с.
6. Круминь, Ю. К. Основы теории и расчета устройств с бегущим магнитным полем. – Рига: Зинатне, 1983. – 278 с.
7. Баранов, Г. А. Расчет и проектирование индукционных МГД-машин с жидкометаллическим рабочим телом / Г. А. Баранов, В. А. Глухих и др. – М.: Атомиздат, 1978. – 248с.
8. Головенко, Е. А. Технология электромагнитного воздействия на расплав алюминия в миксерах и печах / Е. А. Головенко, В. А. Горемыкин, Е. С. Кинев и др. // Цветные металлы. – 2014. № 2 (854). С. 86-92.
9. Тяпин, А. А. Оценка глубины проникновения электромагнитной волны в расплавленный алюминий / Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сборник статей XV Международной научно-практической конференции // А. А. Тяпин, В. Ю. Андриященко, В. А. Горемыкин, Е. С. Кинев. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2018. С. 27-34.
10. Тяпин, А. А. Гидродинамика распределенного поля скоростей расплава алюминия / А. А. Тяпин, В. Ю. Андриященко, В. А. Горемыкин // Методы прогнозирования в технике и технологиях. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Пермь, 28 сентября 2018). – Стерлитамак: АМИ, 2018. – С. 75-85.
11. Мыцык, Г. С. Трехфазные инверторы напряжения, нечувствительные к несимметрии нагрузки / Г. С. Мыцык, Хлаинг Мин У. – М.: Вестник МЭИ. № 4. 2016. – с.62-68.
12. Пью Мьинт Тхейн. Создание информационно-методического обеспечения для системного проектирования статических преобразователей частоты в составе машинно-электронных генерирующих систем для малой энергетики и автономных объектов: Автореф. дис. ... к.т.н. М.: НИУ «МЭИ», 2013. – 20 с.

ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Sahaidak-Nikitiuk R.V.

Doctor of Pharmacy, Professor National University of Pharmacy

Harkusha M.I.

Postgraduate National University of Pharmacy

Demchenko N.V.

PhD in Economics, Associate Professor

National University of Pharmacy

METHODS OF ASSESSING THE IMPACT OF SOCIO-PSYCHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PHARMACY SPECIALISTS ON THE EFFICIENCY OF PROFESSIONAL ACTIVITY

Сагайдак-Нікітюк Р.В.

доктор фармацевтичних наук, професор

Національний фармацевтичний університет

Гаркуша М.І.

аспірант

Національний фармацевтичний університет

Демченко Н.В.

кандидат економічних наук, доцент

Національний фармацевтичний університет

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СОЦІАЛЬНО-ПСИХОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФАХІВЦІВ ФАРМАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЙОГО ПРОФЕСІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Summary: The urgency of the definition of the influence of professionally important socio-psychological characteristics of the pharmacy specialist on the effectiveness of his activity and the efficiency of the functioning of the pharmacy institution is investigated. The method of estimating the influence of socio-psychological characteristics of pharmacists on the pharmacy institution effectiveness is proposed.

Анотація: Досліджено актуальність визначення впливу професійно важливих соціально-психологічних характеристик фахівця фармації на результативність його діяльності та ефективність функціонування аптечного закладу. Запропоновано методику оцінювання впливу соціально-психологічних характеристик фахівців фармації на ефективність діяльності аптечного закладу.

Key words: professionally important social and psychological characteristics, pharmacy technician, effectiveness, pharmaceutical establishment.

Ключові слова: професійно важливі соціально-психологічні характеристики, фахівець фармації, результативність, аптечний заклад.

Introduction. In the conditions of high competition of pharmacy establishments, introduction of requirements of proper pharmacy practice and implementation of European legislation in the field of pharmacy, the main task of the professional activity of pharmacists is to preserve human health. This is due to the fact that the pharmaceutical aid includes timely and high-quality provision of the patient with medicinal products, medical products and parapharmaceutical products, provision of pharmaceutical care and informing patients about responsible self-care, participation in pharmacovigilance and preventive measures, as well as improving the professionalism of pharmacy staff, etc. [1-2]. At the same time, the main requirements and principles that are put forward by the proper pharmacy practice of GPP to the specialists of pharmacy, is "consumer orientation", namely helping him in choosing the most effective drug, disease prevention, etc.

Analysis of recent research. The problems of social and psychological qualities (characteristics) of modern science has not yet been resolved [3]. Thus, investigating the professional communicative

competence of future pharmacists, L.V. Plyaka highlights the need to develop certain individual psychological qualities from the specialists of pharmacy under the scheme "competence → abilities → personal qualities", but its research is limited to the study of exclusively those psychological structures of the personality of a specialist, which provide the process of professional communication in the pharmacy.

In others we reviewed scientific papers presented studies of individual psychological characteristics and qualities of pharmacists: affiliation and communicative tolerance (A.A. Kotvitska, A.S. Nemchenko, N.V. Teterich, L.V. Plyaka), communicative qualities (N.V. Alekhina, L.G. Kaidalova, L.V. Plyaka), empathy (L.V. Plyaka, O.P. Choroniiska, V.S. Shapovalova), social intelligence (N.V. Alekhina, K. O. Demyanik, A.A. Kotvitska, N.V. Teterich), leadership qualities (O.O. Slyusarenko), value orientations (O. Semenyuk), personal social responsibility (N.O. Tkachenko), person professional orientation (I.B. Konyashina), professional self-awareness (N.V. Shvarp) [4-19]. The works of A.A. Kotvitskaya, N.A. Vetutneva, G.V. Zagoriy, M. S. Ponomarenko, S.G. Ubogova, T. Yu.

Shafranskaya touched upon the importance of professional ethical personal qualities of pharmacists [20-23]. All these qualities have a different impact on the performance of a pharmacy specialist and the efficiency of a pharmacy institution.

Selection of previously unsettled parts of the general problem. The sales process in a pharmacy starts at a moment when the visitor crosses its threshold. An expert in pharmacy can influence this process by means of communication with the visitor and his ability to listen to him, to advise him effective medicines, but only due to the high level of professionally important social and psychological characteristics a pharmacist can, on the one hand, satisfy the requirements of the pharmacy visitor, and, on the other hand, ensure the appropriate level of competitiveness of the pharmacy institution.

Based on the research, it has been established that the professionally important socio-psychological characteristics of a pharmacy specialist are a system of optimal individual psychological characteristics and social qualities that influence the effectiveness of his professional activities, taking into account the requirements of domestic and international legislation in the field of pharmacy and GPP pharmacy practice.

Goals and tasks: The purpose of the study is to determine the dependence of the effectiveness of the professional activity of a pharmacy specialist on his socio-psychological characteristics.

Results. The analysis of the vacancies of pharmacy specialists listed on the websites of both domestic and foreign employers, questioning pharmacy specialists,

doctors, pharmacy visitors and graduate students, as well as the regulatory framework regarding the professional activities of pharmacy specialists, allowed to form professionally important socio-psychological characteristics, which should have a specialist pharmacy. These characteristics are: absence of conflict, responsibility, balance, honesty, empathy, energy, initiative, intellectual lability, komandoorientovanist, mennoonfliktnost, creativity, thinking, morality, discipline, memory, patsientotsentrichnist, sense of duty, hard work, self-esteem, the ability to self-regulate emotions, stress, attention, honesty, dedication, value orientation, self-concept. All the selected professionally important socio-psychological characteristics are grouped into the following groups: psycho-emotional, intellectual, volitional (behavioral) and moral qualities, personal attitude, attitude of a specialist towards people, and attitude to work (pharmacy warehouse).

Each socio-psychological characteristic affects the professional competence of a pharmacy specialist, his professional and career advancement and promotes the effective solution of professional tasks. But the attraction of the consumer, in order to increase and obtain the height of stable profits by the pharmacy institution, requires the correct organization of the process of selling medicines, an understanding of the stage at which the consumer is located when making a decision on the purchase of drugs, recognition of the types of buyers, etc. A generalized reflection of the influence of professionally important socio-psychological characteristics of a pharmacy specialist on the effectiveness of their professional activities is shown in Fig.1.

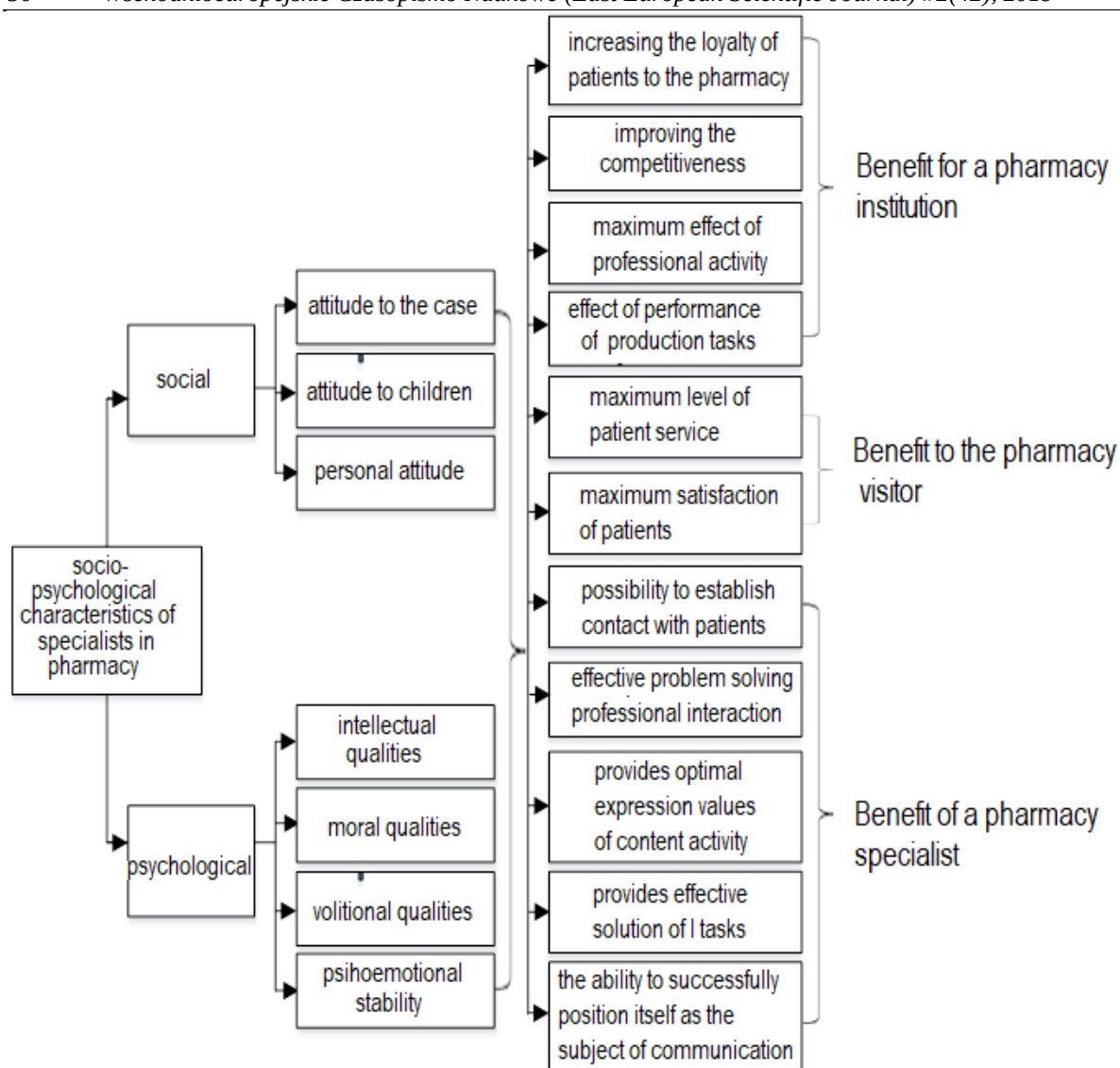


Fig. 1. Influence of socio-psychological characteristics of specialists of pharmacy on the efficiency of their professional activity and the success of the functioning of the pharmacy institution

With the survey of visitors to pharmacies, his attitude towards the pharmacy and pharmacy specialists working in this establishment was determined. 913 respondents from all regions of Ukraine participated in the survey. Among them, 87% of women and 13% men. The majority of visitors come from people over 61 years of age. The opinions of the respondents are not accidental and justified, since the coefficient of concordance is equal to 0.81, the Pearson coefficient exceeds the table value.

The provision of high-level professional services by

the pharmacist has a significant impact on the visitor of the pharmacy institution, but despite the high level of professionalism of a specialist, the low level of his socio-psychological characteristics leads to a backlash from the patient. The patient, coming to the pharmacy, wants not only to receive medicines or advice on responsible self-treatment, but also understanding, sympathy, kindness, a smile and a certain sense of humor. The results of the survey of the opinions of pharmacy visitors about the attitude are shown in Fig. 2

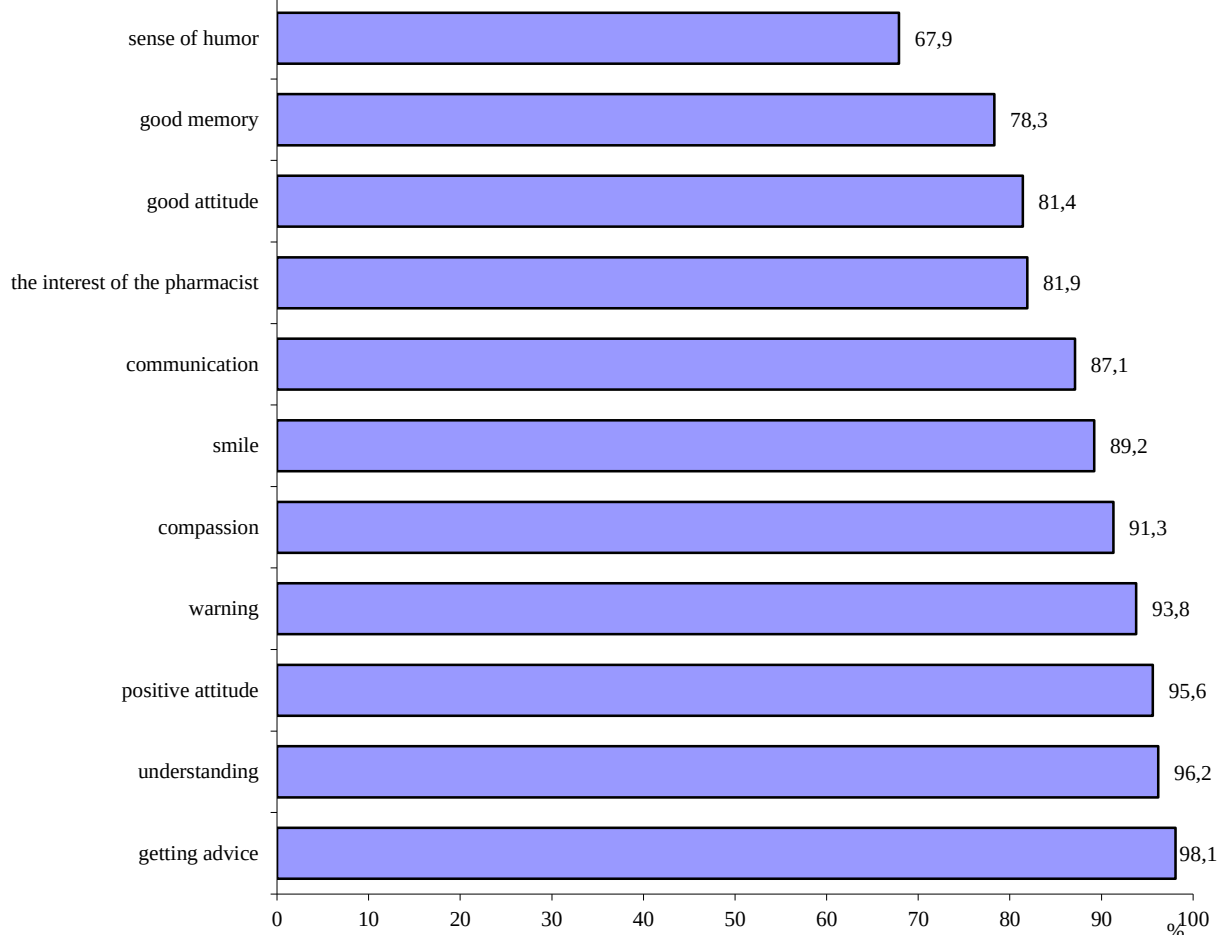


Fig. 2. Reaction patient's attitude to his pharmacy specialists

It is also important for the patient of the pharmacy establishment (78.3% of respondents) to understand and recognize it at the re-visit of the pharmacy (87.1% of respondents expect a substantive communication about their problem, which will answer all the questions of concern to them and the specific advice on treatment).

According to the patient's pharmacy technician is well oriented in the range of pharmaceutical products, which is in the pharmacy and that exists at all, have knowledge about the effectiveness and safety of drugs. The important thing for the patient is the smile of pharmacists (89.2% of respondents), sympathy (91.3%) and attention (93.8% of respondents), positive attitude (95.6% of respondents) and understanding (96.2% of respondents) pharmacists, receiving advice (98.1% of respondents). Therefore, the work of a pharmacy specialist requires considerable labor and emotional expenses, mental abilities, attention, and endurance during prolonged work, while he must perform his professional duties in a qualitative manner taking into account the uneven flow of patients at different times of the day and in different seasons. Thus, the process of providing pharmaceutical assistance to the patient begins with the time when he "crosses the threshold of the pharmacy", and to influence the outcome of this visit the pharmacist can only be in the process of communicating with him.

Once in the pharmacy, the patient immediately assesses his appearance, psychological atmosphere,

quality and competence of the consultation of the pharmacist (assisting in finding the right drug), the breadth of the range of pharmaceutical products, individual approach to each client, speed and positivity of complaints, etc. d., a set of indicators of high-quality pharmaceutical service in the pharmacy. Apart from its appearance, cleanliness and purity, it must be careful, interested and able to persuade patients. Thus, according to experts (83.4% of respondents), 90% of successful sales depend on the ability to communicate to the patient the benefits of medicines.

In order to determine the impact on consumer satisfaction of professionally important socio-psychological characteristics of pharmacists, a pharmacy pharmacy was interviewed regarding the satisfaction of pharmacists provided by pharmacists of this pharmacy with pharmaceutical aid. The survey was conducted in the form of a questionnaire, evaluation was carried out on a tribal scale - unsatisfactory, average level of satisfaction, fully satisfying. At the same time, patients indicated information about the frequency of visits to a particular pharmacy. Based on the received data, a model of dependence of consumer satisfaction (Y_{cs}) on the professionally important socio-psychological characteristics of pharmacy specialists was constructed:

$$Y_{cs} = 0,45 K_{psych} + 3,458 K_{beh} + 1,357 K_{mor} + 4,501 K_{intellekt} +$$

$$+ 0,257 K_{pers\ attitude} + 4,025 K_{attitude\ people} + 1,354 K_{attitude\ to\ pharm},$$

де K_{psych} – psychoemotional qualities;

$K_{intellect}$ – intellectual qualities;

K_{beh} – volitional (behavioral) qualities;

K_{mor} – moral qualities;

$K_{pers\ attitude}$ – personal attitude;

$K_{attitude\ people}$ – the attitude of a specialist to people;

$K_{attitude\ to\ pharm}$ – attitude to the case (pharmacy establishment).

Thus, upon entering the pharmacy, the buyer immediately assesses its appearance, psychological and emotional atmosphere, the quality of consultancy pharmacist (assistance in finding the right medicine), the possibility of consulting a doctor, a wide range of products, an individual approach to each client, etc.

Conclusions. Summing up, it can be concluded that the processes of pharmaceutical services for patients and the sale of pharmaceutical products directly depend on both professional competencies and the personal qualities of a pharmacy specialist. It is clear that he must be a professional in the field of pharmaceutical provision (according to the WHO, about 10% of hospitalizations are caused by misuse of medication), as well as continuous self-improvement and self-development. But the pharmacy patient is very different people. Each of them requires the selection of different approaches, arguments and arguments, while the pharmacist must determine at a glance the level of income, social status and state of the patient's emotional system. Therefore, the socio-psychological characteristics of specialists in pharmacy have no less importance than professional ones - it's easier to find a good person and make a professional from her than to find a professional and make a good person out of her. As practice shows, not always the correct actions of the pharmacist and the well-organized work of the pharmacy brings the desired effect to the patient and he moves to another institution, that is, to a competitor. In addition, the patient has to constantly feel its significance for the institution, creative approach, creativity and positive mood of the pharmacist. Thus, to increase the volume of pharmacy sales, and accordingly, the pharmacy sales, by providing qualified pharmaceutical services, will be able to specialist pharmacy, which has professional qualities (knowledge of the range, speed of information provision, etc.) and necessarily a certain set of professionally important socio-psychological characteristics (attentiveness, organization, responsibility, empathy, etc.).

References

1. Dovidnyk kvalifikatsiinykh kharakterystyk profesii pratsivnykiv. Vyp. 78 «Okhorona zdorovia». Nakaz MOZ Ukrainy 29.03.2002 p. № 117. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.moz.gov.ua/ua/portal/dn201308120720.html>.
2. Nalezha aptechna praktyka: standarty yakosti aptechnykh posluh: spilna nstanova MFF/VOOZ z

NAP. [Electronic resource]. – Access mode: http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/897_009. Назва 3 ек-паны.

3. Kletsyna Y. S. Sotsyalno-psykholohycheskye kharakterystyky lychnosti / Y. S. Kletsyna // Praktikum po sotsyalnoi psykholohyy; [pod red. Kletsynoi Y. S.]. – SPb.: Pyter, 2008. – C. 77-83.

4. Alohkina N. V. Sotsialnyi intelekt v strukturi sotsyalnoi kompetentnosti fakhivtsiv farmatsii / N. V. Alohkina // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu im. V.N. Karazina. «Psykhologhiia». – 2013. – Вип. 51, № 1046. – C. 60–63.

5. Kaidalova L. H. Profesiina pidhotovka maibutnikh fakhivtsiv farmatsevtichnoho profilu u vyshchykh navchalnykh zakladakh : monohrafiia / L. H. Kaidalova. – X. : HФaY, 2010. – 411 c.

6. Kaidalova L. H. Psykholohichna ta sotsialna kompetentnosti maibutnikh fakhiv-tziv / L. H. Kaidalova, N. V. Alohkina // Pedahohika, psykholohiia ta medyko-biolohichni problemy fizychnoho vykhovannia ta sportu. – №4. – Kharkiv, 2009. [Electronic resource]. – Access mode: <http://91.234.42.22/bitstream/123456789/2929/1/1.pdf>

7. Kaidalova L.H. Sotsialno-psykholohichna kompetentnist maibutnikh fakhivtsiv farmatsii / L. H. Kaidalova, N. V. Alohkina, I.S. Sabatovska // Sotsialna farmatsiia: stan, problemy ta perspektyvy : mater. II mizhn. nauk.-prakt. konferentsii, m. Kharkiv, 27-30 kvitnia 2015. – X., 2015. – C. 296-297.

8. Koniashyna I. B. Vplyv protsessu formuvannia profesiinykh kompetentnostei farmatsevtiv na fakhovu spriamovanist do maibutnoi profesii / I. B. Koniashyna. – 2017. [Electronic resource]. – Access mode: <http://pedagogy-journal.kpu.zp.ua/archive/2017/54/19.pdf>

9. Nemchenko, A. S. Sotsialno-psykholohichni ta etychni aspekty realizatsii likarskykh zasobiv / A. S. Nemchenko, A. A. Kotvitska, N. V. Teterych // Klinichna farmatsiia. – 2009. – № 9. – C.28-30.

10. Pliaka L. V. Psykholohichni osoblyvosti rozvytku profesiinnoi komunikativnoi kompetentnosti u maibutnikh provizoriv : avtoref. dys. ... PhD. psykol. nauk / L. V. Pliaka. – K., 2010. – 22 c.

11. Pliaka L. V. Tolerantnist yak skladova profesiinnoi komunikativnoi kompetentnosti maibutnikh provizoriv / L. V. Pliaka // Rozvytok osvity v umovakh polietnichnoho rehionu : mater. Mizhnar. nauk.-prakt. konf., (Ialta, 9–11 kvitnia 2009 p.). – 2009. – Вип. 5. – Ч. 2. – C. 145-147.

12. Pliaka L. V. Formuvannia empatii yak profesiino znachymoi yakosti osobystosti maibutnoho provizora / L. V. Pliaka // Zb. nauk. pr. z problem teorii i praktyky psykholoho-pedahohichnoho zabezpechennia protsesu navchannia i vykhovannia v zakladakh osvity riznykh typiv i rivniv akredytatsii. – Vyp. 3. – K. : Ekmo, 2008. – C. 210-217.

13. Semeniuk O. Tsinnisna oriientatsiia yak osnova formuvannia profesiinnoi kompetentnosti maibutnikh farmatsevtiv / O. Semeniuk // Osvita rehionu. Ukrainskyi naukovyi zhurnal. – 2011. – № 3. – C. 235–239.

14. Sliusarenko O. O. Liderski yakosti v systemi vymoh dofakhivtsiv farmatsevychnoi haluzi / O. O. Sliusarenko // Naukovi zapysky Berdianskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu. «Pedahohichni nauky». – 2016. – Vip. 3. – C. 145-149.
15. Teterych N. V. Doslidzhennia osoblyvosti komunikativnoi sfery provizoriv shliakhom vymiriuvannia sotsialnoho intelektu / N. V. Teterych, A. A. Kotvitska, K.O. Demianik // Aktualni pytannia farmatsevychnoi i medychnoi nauky ta praktyky. – 2010. – №4. – C. 64-67.
16. Tkachenko N. O. Rozuminnia poniattia «osobysta sotsialna vidpovidalnist» maibutnimy spetsialistamy farmatsii / N. O. Tkachenko // Farmatsevychnyi chasopys. – 2015. – № 3. – C. 88-92.
17. Chornopyska O. P. Vykladannia dystsypliny «Elementy praktychnoi psykholohii» v systemi pisliadyplomnoi osvity provizoriv / O. P. Chornopyska // Bukovynskyi medychnyi visnyk. – 2016. – T. 20. – № 4 (80). – C. 249-252.
18. Shapovalova V. S. Empatiia yak odyin iz faktoriv uspishnoi profesiinoi diialnosti farmatsevtiv / V. S. Shapovalova // Molodyi vchenyi. – 2017. – №4 (44). – C. 267 -270.
19. Shvarp N. V. Formuvannia profesiinoi samosvidomosti studentiv farmatsevychnoho universytetu u protsesi fakhovoi pidhotovky : avtoref. dys. ... kand. ped. nauk : 13.00.04 / N. V. Shvarp; KhNPU im. H. S. Skovorody. – K., 2011. – 21 c.
20. Vetutneva N. O. Doslidzhennia etychnykh aspektiv diialnosti provizoriv – upovnovazhenykh osib aptechnykh zakladiv / N. O. Vetutneva, S. H. Ubohov, H. V. Zahorii // Zbirnyk naukovykh prats spivrobitnykiv NMAPO im. P. L. Shupyka. – 2014. – 23(1). – C. 522-533. – [Electronic resource]. – Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpsnmapo_2014_23\(1\)_74](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpsnmapo_2014_23(1)_74)
21. Kotvitska A. A. Doslidzhennia vprovadzhennia etychnoho kodeksu farmatsevychnykh pratsivnykiv Ukrainy v praktychnu diialnist / A. A. Kotvitska, I. O. Surikova, N. B. Gavrish // Sotsialna farmatsiia v okhoroni zdorovia. – 2015. – T. 1, № 1. – C. 45–52.
22. Tyler L. E. Work and Individual differences / L. E. Tyler // Man in a World of Work/ Boston. 1964.
23. Sahaidak-Nikitiuk R.V. Methodological substantiation of the system of socio-psychological characteristics of the professional activity of a pharmacy specialist / R.V.Sahaidak-Nikitiuk, M.I.Harkusha // Social Pharmacy in Public Health. – 2016. – № 17. – C. 44–51.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Gilazhov Y.G.

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chief Researcher of engineering laboratory «Petrochemistry»,
Atyrau University of Oil and Gas,
Atyrau, Kazakhstan*

Aronova A.A.

*Master of Engineering and Technology,
Junior Researcher of engineering laboratory «Petrochemistry»,
Atyrau University of Oil and Gas,
Atyrau, Kazakhstan*

Izgaliyev S.A.

*Junior Researcher of engineering laboratory «Petrochemistry»,
Atyrau University of Oil and Gas,
Atyrau, Kazakhstan*

Baishakhanova A.A.

*1st year of master student of the department «Chemistry and Chemical Technology»,
Atyrau University of Oil and Gas,
Atyrau, Kazakhstan*

COMPARISON OF EFFICIENCY OF METHYL-TERT-BUTYL ETHER AND ETHYNYLCYCLOHEXANOL TO INCREASE THE OCTANE NUMBER OF STRAIGHT-RUN GASOLINE

Гиладжов Есенгали Гиладжович

*доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории инженерного профиля «Нефтехимия»,
Атырауский университет нефти и газа,
г.Атырау, Казахстан*

Аронова Акбота Аронкызы

*магистр техники и технологий,
младший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля «Нефтехимия»,
Атырауский университет нефти и газа,
г.Атырау, Казахстан*

Изгалиев Сансызбай Аскарович

*младший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля «Нефтехимия»,
Атырауский университет нефти и газа,
г.Атырау, Казахстан*

Байшаханова Анар Асылбековна

*магистрант 1-курса кафедры «Химия и химическая технология»,
Атырауский университет нефти и газа,
г.Атырау, Казахстан*

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО ЭФИРА И ЭТИНИЛЦИКЛОГЕКСАНОЛА НА ПОВЫШЕНИЕ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА ПРЯМОГОННОГО БЕНЗИНА

Summary: One of the ways to expand the production of high-octane unleaded gasoline is the use of oxygen-containing components (oxygenates). The addition of oxygenates increases the detonation resistance, especially of light fractions, the completeness of gasoline combustion, reduces fuel consumption and reduces the toxicity of exhaust gases. It has been established that such a quantity of oxygenates, despite their lower calorific value compared to gasoline, does not adversely affect the power characteristics of the engines. In this work, a new innovative technology has been developed for the production of oxygen-containing additives that increase the octane number of gasoline based on tertiary acetylene alcohols. The possibilities of using ethynylcyclohexanol as an additive for motor gasoline have been studied, both in pure form and in methyl tert-butyl ether mixture.

Аннотация: Одно из направлений расширения производства высокооктановых неэтилированных бензинов - применение кислородсодержащих компонентов (оксигенатов). Добавление оксигенатов повышает детонационную стойкость, особенно легких фракций, полноту сгорания бензина, снижает расход топлива и уменьшает токсичность выхлопных газов. Установлено, что такое количество оксигенатов, несмотря на их более низкую по сравнению с бензином теплотворную способность, не оказывает отрицательного влияния на мощностные характеристики двигателей.

В настоящей работе разработана новая инновационная технология получения кислородсодержащих присадок, повышающих октановое число бензина на основе третичных ацетиленовых спиртов. Изучено возможностей использования этинилциклогексанола в качестве присадки автомобильных бензинов, как в чистом виде, так и в смеси метил-трет-бутиловым эфиром.

Key words: *straight-run gasoline, oxygenate, octane number, ethynylcyclohexanol, methyl tert-butyl ether.*

Ключевые слова: *прямогонный бензин, оксигенат, октановое число, этинилциклогексанола, метил-трет-бутиловый эфир.*

Постановка проблемы. Проблема повышения октанового числа бензинов до требуемого уровня во всем мире решается комбинированно: с одной стороны, совершенствованием технологий традиционных процессов переработки нефти – каталитического крекинга, алкилирования, изомеризации, обеспечивающих получение высокооктановых компонентов топлив, с другой, применением октаноповышающих добавок и присадок.

Одной из основных задач в улучшении экологических характеристик автомобильных бензинов является сокращение применения бензинов, содержащих тетраэтилсвинец (ТЭС) в качестве антидетонатора. Эта задача решена в Японии, США и Канаде. В некоторых странах: Голландии, Австрии, Дании, Бельгии, Швейцарии, Швеции, Финляндии, Норвегии и Германии разрешено вводить этиловую жидкость только в специальные высокооктановые сорта.

Переход на неэтилированные топлива не только предотвращает эмиссию свинца с продуктами сгорания, но и сокращает на 60-90 % другие вредные выбросы путем использования каталитических нейтрализаторов, для которых свинец является ядом. Кроме того, в этом случае возможно поддержание состава топливно-воздушной смеси, близкое к стехиометрическому, что обеспечивает такие оптимальные характеристики бензина, как плотность, вязкость, испаряемость, углеводородный состав, которые практически не влияют на токсичность отходящих газов. Но отказ от этилирования влечет за собой проблемы, связанные с обеспечением требуемого октанового числа бензина [1-4].

Среди проблем, связанных с антропогенным воздействием технического прогресса на окружающую среду, проблема сокращения вредных выбросов в атмосферу автомобильным транспортом занимает первое место [1-2]. Согласно требованиям Технического регламента на топлива Таможенного союза, использование металлосодержащих присадок с 2015 года полностью прекращено, поэтому большой интерес в качестве антидетонационной присадки представляют неметаллические соединения, а прежде всего оксигенаты.

Развитие производства бензинов в первую очередь связано со стремлением улучшить основное эксплуатационное свойство топлива – детонационную стойкость бензина, оцениваемую октановым числом и снизить себестоимость его получения. В основном, товарные бензины получают за счёт компаундирования (смешения) нескольких компонентов, присадок и добавок. Так, например, для улучшения эксплуатационных свойств бензинов, в том числе и повышения их октанового числа, в бензины

вводят такие кислородсодержащие компоненты, как метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ), метил-трет-амиловый эфир (МТАЭ), топливный этанол и др. Состав вводимых в бензин добавок определяется применяемых на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) технологий получения бензинов.

Анализ последних исследований и публикаций. Над проблемами синтеза и создания новых кислородсодержащих присадок, повышающих октановое число бензина проводились исследования известными российскими учеными Даниловым А.М., Емельяновым В.Е., Онойченко С.Н., Капустиным В.М., Карповым С.А., Царёвым А.В. в стенах: Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина, ВНИИПП (Москва), МГУ, института органической химии, института нефтехимического синтеза РАН, института катализа СО РАН, ОАО «ВНИИНефтехим» и другие [5-6].

Кислородсодержащие присадки представлены сложными и простыми эфирами монокарбоновых кислот, высшими спиртами, окисленными фракциями углеводородов, содержащими смеси кислот, спиртов и эфиров, оксиэтилированными соединениями [5-8].

Добавление оксигенатов повышает детонационную стойкость, особенно легких фракций, полноту сгорания бензина, снижает расход топлива и уменьшает токсичность выхлопных газов. Рекомендуемая концентрация оксигенатов в бензинах составляет 3-15% и выбирается с таким расчетом, чтобы содержание кислорода в топливе не превышало 2,7%. Установлено, что такое количество оксигенатов, несмотря на их более низкую по сравнению с бензином теплотворную способность, не оказывает отрицательного влияния на мощностные характеристики двигателей.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В то же время до сих пор не исследовано антидетонационные свойства третичных ацетиленовых спиртов. Третичные ацетиленовые спирты интересны тем, что они как все известные антидетонаторы в составе молекулы имеют третичные алкильные радикалы, гидроксильный радикал и ацетиленовую непредельную группу. Поэтому исследование и разработка новых кислородсодержащих присадок повышающих октановое число бензина на основе третичных ацетиленовых спиртов является инновационным и весьма актуальным.

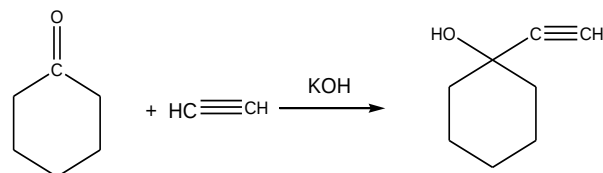
Проблема синтеза и создания новых кислородсодержащих присадок, повышающих октановое число бензина в Казахстане мало изучена и пока только остается на уровне научных исследований и

не находит рекомендации для широкого промышленного использования.

В лаборатории ЛИП «Нефтехимия» Атырауского университета нефти и газа в течение последних несколько лет проводится исследования изучения свойств некоторых циклических третичных ацетиленовых спиртов, повышающих октановое число бензина. Полученные нами положительные результаты [9] указывают на необходимость продолжения исследований над новыми оксигенатами на основе третичных ацетиленовых спиртов.

Цель статьи. Целью настоящей работы является исследование и разработка новых инновационных технологий получения кислородсодержащих присадок, повышающих октановое число бензина на основе третичных ацетиленовых спиртов и изучение возможностей использования этинилциклогексанола в качестве присадки автомобильных бензинов, как в чистом виде, так и в смеси метил-трет-бутиловым эфиром.

Изложение основного материала. Циклический ацетиленовый спирт нами получен конденсацией циклогексанона с ацетиленом в условиях модифицированной реакции Фаворского, под давлением в присутствии порошкообразного едкого калия в среде диэтилового, петролейного эфира по следующей схеме:



Константы синтезированного спирта, приведена в таблице 1, соответствуют литературным данным [10,11]. Строение синтезированного ацетиленового спирта подтверждается ИК- и ПМР-спектрами (таблица 2).

Таблица 1

- Физико-химические свойства 1-этинилциклогексанола-1

Наименование	Выход	Брутто формула	Найдено, %		Вычислено, %		T _{пл} , °C
			C	H	C	H	
1-этинилцикло-гексанол-1	80	C ₈ H ₁₂ O	77,30	9,60	77,41	9,67	29-30

Таблица 2

- Частота валентных колебаний в ИК-спектрах и величины химических сдвигов в спектрах ПМР 1 этинилциклогексанола-1

Наименование	ИК-спектр, см ⁻¹				ПМР-спектр, δ м.д.		
	-OH	≡CH	-C≡C-	-CH ₃	-CH ₂ -	≡CH	-OH
1-этинилцикло-гексанол-1	3330	3210	2118	-	1,58	2,56	4,34

Методы исследования. Определение октанового числа бензиновых композиций, содержащих предлагаемые добавки, проводили экспресс методом на измерителе детонационной стойкости бензинов на Октанометре SHATOX SX-100K (Фирма изготовитель НПО «SHATOX», ИХН СО РАН). При этом в качестве эталонов сравнения использованы параметры, которые соответствует ГОСТ Р 51866-2002(ЕН 228-99), ТУ 4215-002-60283547-2006.

Результаты и дискуссия. Влияние этинилциклогексанола на повышение октанового

числа бензина нами определялось по приросту октанового числа прямогонного бензина производства ТОО «Атырауский нефтеперерабатывающий завод». Эффективность кислородсодержащих присадок (оксигенатов) в качестве высокооктановых компонентов исследовали при введении их в бензин в концентрации от 3-х до 15 % (масс.). В таблицах 3-4 представлены результаты добавки этинилциклогексанола (ЭЦГ) и метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) на прямогонного бензина производства ТОО «Атырауский нефтеперерабатывающий завод».

Таблица 3

Изменение октанового числа прямогонного бензина, при добавлении МТБЭ

Бензин	МТБЭ кол-во, %	Октановое число, ИМ, ГОСТ 8226-82			Октановое число, ММ, ГОСТ 511-82		
		Без добавки	С добавкой	При рост ОЧ	Без добавки	С добавкой	При рост ОЧ
Прямогонный бензин (АВТ), ρ=0,7187 г/см ³	3	58,4	59,8	+1,4	48,9	49,8	+0,9
	5	-/-	60,7	+2,3	-/-	50,7	+1,8
	7	-/-	61,7	+3,3	-/-	51,7	+2,8
	11	-/-	63,6	+5,2	-/-	53,6	+4,7
	15	-/-	64,6	+6,2	-/-	54,7	+5,8

Изменение октанового числа прямогонного бензина, при добавлении этинилциклогексанола

Бензин	ЭЦГ кол-во, %	Октановое число, ИМ, ГОСТ 8226-82			Октановое число, ММ, ГОСТ 511-82		
		Без добавки	С добавкой	При рост ОЧ	Без добавки	С добавкой	При рост ОЧ
Прямогонный бензин (АВТ), $\rho=0,7187 \text{ г/см}^3$	3	58,4	60,1	+1,7	48,9	50,1	+1,2
	5	-//-	61,3	+2,9	-//-	51,3	+2,4
	7	-//-	63,5	+5,1	-//-	53,5	+4,6
	11	-//-	64,7	+6,3	-//-	54,8	+5,9
	15	-//-	66,7	+8,3	-//-	57,1	+8,2

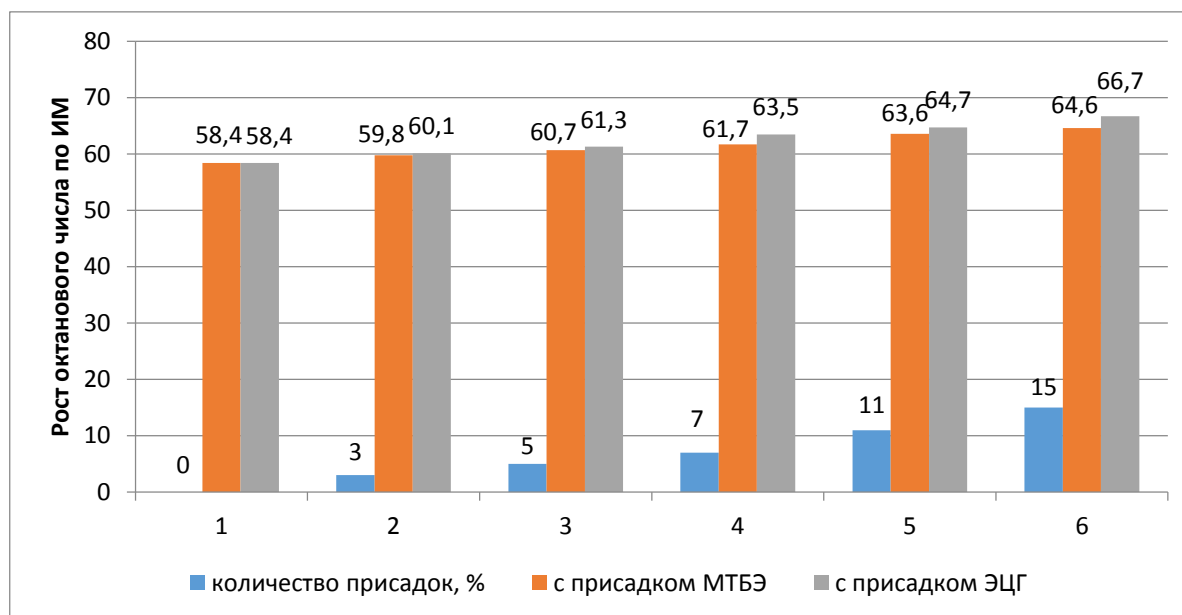


Рисунок 1 - Изменение октанового числа прямогонного бензина при добавлении МТБЭ и этинилциклогексанола по ИМ

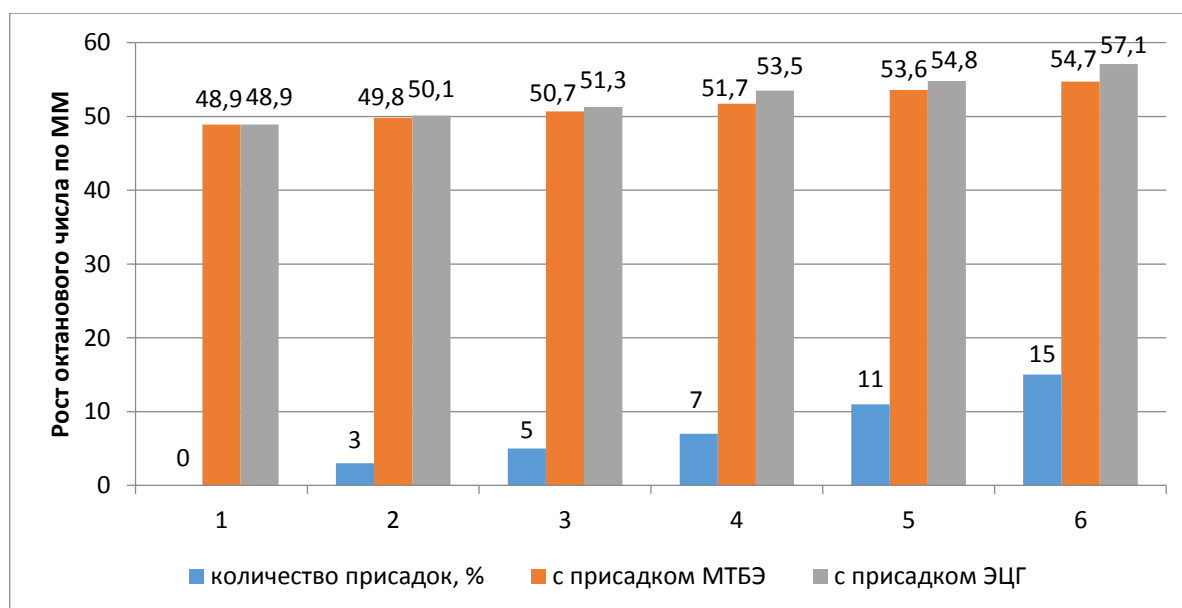


Рисунок 2 - Изменение октанового числа прямогонного бензина при добавлении МТБЭ и этинилциклогексанола по ММ

Из рисунков 1 и 2 видно, что этинилциклогексанол повышает октановое число прямогонного бензина даже при его содержании в меньшем количестве, чем метил-трет-бутиловый эфир.

Как показал проведенный литературный поиск больший эффект достигается от действия смеси присадок вследствие проявления синергетического

эффекта [1-2,5-6,12]. Поэтому на втором этапе исследований была проверена эффективность применения бинарных присадок, состоящих из этинилциклогексанола и метил-трет-бутиловый эфира. Октановые числа смешения присадок в прямогонном бензине представлены в таблице 5.

Таблица 5

- Изменение октанового числа прямогонного бензина, при добавлении МТБЭ+ЭЦГ (1:1)

Бензин	МТБЭ+ЭЦГ (1:1) кол-во, %	Октановое число, ИМ, ГОСТ 8226-82			Октановое число, ММ, ГОСТ 511-82		
		Без добавки	С добавкой	При рост ОЧ	Без добавки	С добавкой	При рост ОЧ
Прямогонный бензин (АВТ), $\rho=0,7187 \text{ г/см}^3$	3	58,4	61,5	+3,1	48,9	51,5	+2,6
	5	-/-	62,2	+3,8	-/-	52,2	+3,3
	7	-/-	64,4	+6,0	-/-	54,4	+5,5
	11	-/-	65,6	+7,2	-/-	55,6	+6,7
	15	-/-	68,3	+9,9	-/-	58,7	+9,8

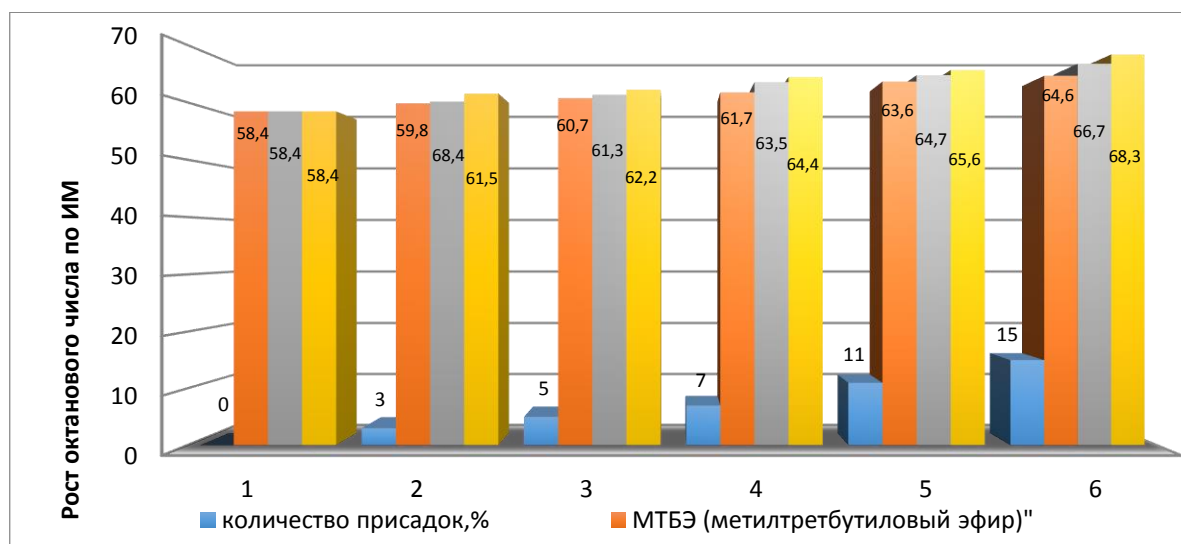


Рисунок 3 - Изменение октанового числа прямогонного бензина при добавлении кислородсодержащих присадок по ИМ

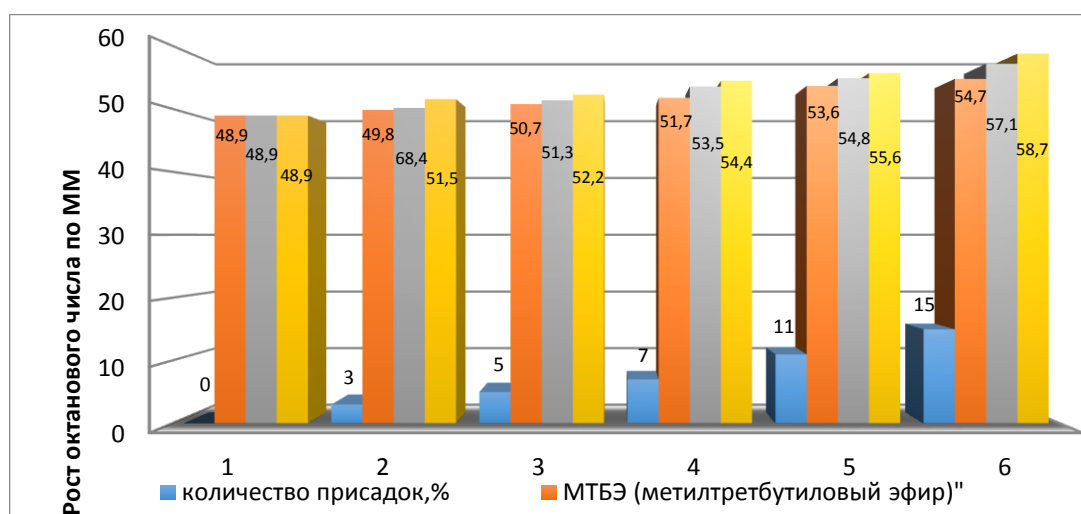


Рисунок 4 - Изменение октанового числа прямогонного бензина при добавлении кислородсодержащих присадок по ММ

Из рисунков 3 и 4 видно во всех случаях повышение октанового числа за счет усиления синергетического эффекта при исследовательском и моторном методе.

Таким образом, нами показано, что третичный ацетиленовый спирт – этинилциклогексанола можно использовать как кислородсодержащий добавок автомобильных бензинов. Применение ЭЦГ позволит расширить ресурсы высокооктановых компонентов, снизить токсичность бензинов и отработавших газов. Позволит увеличить выпуск высококачественного товарного бензина для автомобильных двигателей и обеспечить минимизации отрицательного воздействия отработавших газов на окружающую среду.

Выводы и предложения. Исследована антидетонационная свойства третичного циклического ацетиленового спирта. Третичный ацетиленовый спирт этинилциклогексанола интересен тем, что он как все известные антидетонаторы в составе молекулы имеет третичный алкильный радикал, гидроксильный радикал и ацетиленовую непредельную группу. Поэтому исследование и разработка новых кислородсодержащих присадок повышающих октановое число бензина на основе третичных ацетиленовых спиртов является актуальным в плане инноваций.

Результаты исследование об эффективности метил-трет-бутилового эфира и этинилциклогексанола показала, что этинилциклогексанола повышает октановое число прямогонного бензина, даже при его содержании в меньшем количестве, чем метил-трет-бутиловый эфир. Можно использовать третичный ацетиленовый спирт – этинилциклогексанола как кислородсодержащую добавку, который позволит увеличить выпуск высококачественного товарного бензина для автомобильных двигателей и обеспечит чистоту топливной системы и экономию топлива.

Список литературы:

1. Емельянов В.У. Проблемы производства автомобильных бензинов и пути их решения // Мир нефтепродуктов. 2010. №3. С 10-13.
2. Данилов А.М.. Присадки и добавки. Улучшение экологических характеристик нефтяных топлив. М.: Химия, 1996, с.102-108.
3. Simultaneous enhancement of ethanol supplement 3n gasoline and its quality improvement/ Kiatkittipong Worapon, Thipsunet Piaporn, Goto Shigeo And others// Fuel Process. Technol. – 2009. -89, № 2. – P.1365-1370.
4. Oxygenated gasoline additives: saturated heat capacities between (227 and 355) K/ Paramo R., Zouine M., Sobron F., Casanova C.// J. Chem. And Eng. Date. -2004.-49, № 1. – P.58-61.
5. Данилов А.М.. Применение присадок в топливах. – М.: Мир, 2005. -288 с..
6. Емельянов В.Е. Все о топливе. Автомобильный бензин: Свойства, ассортимент, применение –М.: ООО «Издательство Астрель»: 2003. -79 с.
7. Магарил Е.Р., Магарил Р.З. Моторные топлива: учебное пособие / Е.Р. Магарил, Р.З. Магарил. - М.: КДУ, 2008. - 160 с
8. Оксигенаты в автомобильных бензинах /В.М. Капустин, С.А. Карпов, А.В. Царёв. – М.: КолосС, 2011. – 336с.
9. Патент РК № 28915. Октаноповышающая добавка к бензину. Гилязов Е.Г., Сериков Т.П., Козырев Д.В. и др.// бюллетень № 6, 15.06.2015г.
10. Назаров И.Н. Избранные труды. М., Наука, 1961, 690 с.
11. Гилязов Е.Г. Синтез и превращение метакриловых эфиров циклических, гетероциклических ацетиленовых спиртов: Диссертация кандидата химических наук Алматы, 1988. 147 с.
12. А.А.Гуреев,И.В.Коротков, Г.И. Левинсон, Г.Н.Баранова Применение эфиров в качестве высокооктановых компонентов бензинов//Химия и технология топлив и масел-1983.№6.-с.6-8.

#2 (42), 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)

#2 (42), 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>