

СОДЕРЖАНИЕ

Математика и математическое моделирование

<i>Романов М. А., Толстель О. В.</i> Программное обеспечение автоматизированной производственной линии	5
<i>Билык К. Б., Ткаченко С. Н., Бодня А. В.</i> Математическое моделирование процесса привлечения клиентов для платных SAAS-решений	21
<i>Головенко М. В., Толстель О. В., Михеенко Д. В.</i> Математическое обеспечение построения оптимальных маршрутов на карте с препятствиями	27
<i>Персичкин А. А., Хватов Д. А., Шпилевой А. А.</i> Методика обработки результатов экспертной оценки угроз безопасности информации	39

Теоретическая и экспериментальная физика

<i>Колесников А. В., Румовская С. Б., Ясинский Э. В., Барзенков А. В.</i> Интеллектуализация оперативно-технологического управления региональной электроэнергетикой методами когнитивных гибридных интеллектуальных систем. Часть 3	43
<i>Филатова М. Г., Алецкая В. А., Шпилевая С. Г.</i> Физические аспекты обеспечения качественной мобильной радиосвязью периферийного населенного пункта Калининградской области	66
† <i>Leble S. B., Yurov A. V.</i> Initial problem for heat equation with multisoliton inhomogeneity and one-loop quantum corrections	76
<i>Юров В. А., Юрова А. А.</i> Миры «Фениксы»	80
<i>Молчанов С. В., Чижма С. Н., Холмогорова М. Д.</i> Применение адаптивных алгоритмов управления для повышения производительности беспроводного оптического канала связи	86
† <i>Зайцев А. А., Руденко А. И., Алексеева С. М.</i> Распространение синусоидальных волн в двуслойной стратифицированной по плотности жидкости	95
<i>Еремеев А. А.</i> О применении технологии 5G в автоматизации распределительных электросетей	107

CONTENTS

Mathematics and math modeling

<i>Romanov M. A., Tolstel O. V.</i> Automated production line software.....	5
<i>Bilyk K. B., Tkachenko S. N., Bodnya A. V.</i> Mathematical modeling of the process of attracting customers for paid SAAS solutions.....	21
<i>Golovenko M. V., Tolstel O. V., Mikheenko D. V.</i> Mathematical support for constructing optimal routes on a map with obstacles.....	27
<i>Persichkin A. A., Khvatov D. A., Shpilevoy A. A.</i> Methodology for processing the results of expert assessment of information security threats	39

Theoretical and experimental physics

<i>Kolesnikov A. V., Rumovskaya S. B., Yasinsky E. V., Barzenkov A. V.</i> Intellectualization of operational and technological control of regional electric power by cognitive hybrid intelligent systems. Part 3	43
<i>Filatova M. G., Aletskaya V. A., Shpilevaya S. G.</i> Physical aspects of the providing high-quality mobile radio communication to the peripheral settlement of the Kaliningrad region.....	66
† <i>Leble S. B., Yurov A. V.</i> Initial problem for heat equation with multisoliton inhomogeneity and one-loop quantum corrections.....	76
<i>Yurov V. A., Yurova A. A.</i> Worlds «Phoenix»	80
<i>Molchanov S. V., Chizhma S. N., Kholmogorova M. D.</i> Application of adaptive control algorithms to improve the performance of a wireless optical communication channel	86
† <i>Zaitsev A. A., Rudenko A. I., Alekseeva S. M.</i> Propagation of sine waves in a two-layer density-stratified fluid.....	95
<i>Eremeev A. A.</i> About the application of 5G technology in the automation of power distribution networks.....	107

УДК 004

М. А. Романов, О. В. Толстель

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ**

5

Поступила в редакцию 06.05.2021 г.
Рецензия от 21.06.2021 г.

Описывается модернизация линии производства металлочерепицы. Требовалось перевести линию на отечественные компоненты и внедрить устройства мелкодисперсной смазки металлочерепицы для повышения качества продукции и уменьшения количества брака. Была построена параметрическая модель гидростанции, разработана математическая модель изменения температуры внутри гидростанции, определен вид передаточной функции, разработаны блок-схема алгоритма управления линии производства металлочерепицы, программное обеспечение для оборудования марки «Овен» автоматизированной линии: логического контроллера ПЛК160 и панели оператора СП310-Р.

The modernization of the metal tile production line is described. It was required to transfer the line to domestic components and introduce devices for fine lubrication of metal tiles to improve the quality of products and reduce the number of rejects. A parametric model of the hydroelectric station was built, a mathematical model of the temperature change inside the hydroelectric station was developed, the type of transfer function was determined, a block diagram of the control algorithm for a metal tile production line was developed, software was developed for the equipment of the "Овен" brand of an automated line: a logical controller PLC160 and an operator panel SP310-R.

Ключевые слова: программируемый логический контроллер (ПЛК), панель оператора, CoDeSyS, гидростанция, мелкодисперсная смазка, масляный туман, передаточная функция

Keywords: programmable logic controller (PLC), operator panel, CoDeSyS, hydrostation, fine grease, oil mist, transfer function

Металлочерепица — кровельный материал, представляющий собой листы, изготовленные из тонколистовой стали, алюминия или меди, покрытые полимерным защитным слоем, профилированные методом холодного давления. Листы металлочерепицы по внешнему виду напоминают кладку керамической черепицы, что позволяет во многом сохранить достоинства последней.



Металлочерепица применяется в качестве покрытия для скатных кровель с минимальным углом наклона ската 14° . Рекомендуется использовать данный вид кровельного покрытия в условиях с неагрессивной или слабоагрессивной степенью воздействия окружающей среды при температуре воздуха от -50 до $+50^\circ\text{C}$.

Производство металлочерепицы осуществляется на специальных полностью автоматических линиях путем профилирования металлического тонколистового ($0,4-0,5$ мм) проката методом холодного давления. Сначала прокат проходит через систему профилировочных роликов, создающих волнообразный профиль. После этого холодной штамповкой формируется поперечная волна. Именно благодаря данному виду штамповки металлический лист приобретает форму черепицы. Далее осуществляется нарезка на листы необходимой длины. После этого уже готовые изделия укладывают в пачки и упаковывают в транспортные пакеты.

В рамках данной работы ставились следующие задачи:

1. Определить компоненты для замены в линии производства металлочерепицы.
2. Внедрить в линию гидростанцию для подачи смазочного материала масляным туманом [1].
3. Разработать математическую модель изменения температуры паромасляной смеси в гидростанции.
4. Разработать программное обеспечение для линии.
5. Разработать панель оператора.

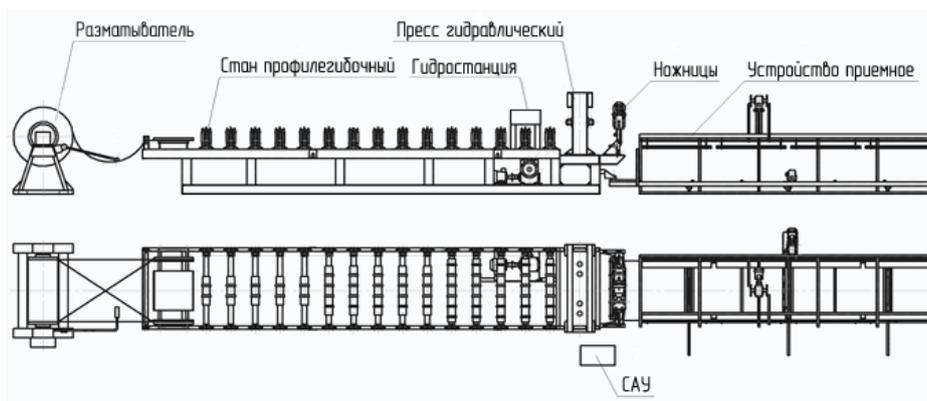
Далее рассмотрим выполнение поставленных задач.

Описание линии производства металлочерепицы

Линия производства металлочерепицы состоит из следующих элементов:

- размотчик, на который надевается рулон металла;
- станы профилировочные, которые отвечают за придание листу металла необходимой формы;
- гидростанция, которая смазывает металл перед гидравлическим прессом по принципу масляного тумана;
- пресс гидравлический для придания окончательной формы металлочерепице;
- ножницы для отреза металлочерепицы нужного размера;
- приемное устройство, в которое попадает отрезанный лист металлочерепицы;
- система автоматического управления, отвечающая за работоспособность линии [2].

На рисунке 1 представлена схема такой линии, на рисунке 2 — фрагмент автоматизированной линии производства металлочерепицы на предприятии.



7

Рис. 1. Схема линии производства металлочерепицы [2]

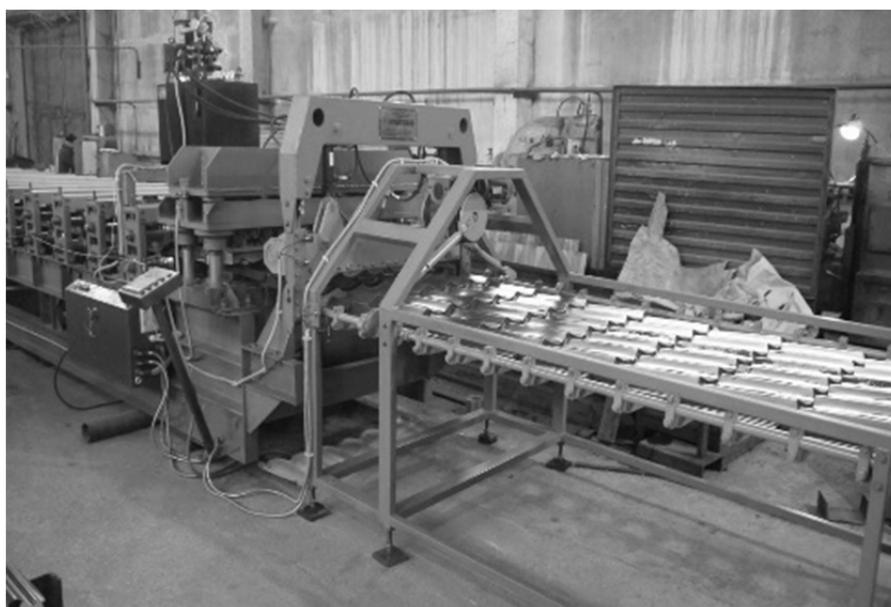


Рис. 2. Фрагмент автоматизированной линии производства металлочерепицы на предприятии

На предприятии, где проводилась работа, линия была оснащена китайскими компонентами – контроллером Delta и сенсорной панелью Weintek.

Произведена замена китайских комплектующих на отечественные комплектующие от компании «ОВЕН» – ПЛК160 и СП310-Р, разработана модель внедрения в линию устройства мелкодисперсной смазки для повышения эффективности работы. Также для обновленной линии было написано программное обеспечение.



Построение параметрической модели гидростанции

Моделирование (в широком смысле) является основным методом исследований во всех областях знаний и научно обоснованным методом оценки характеристик сложных систем, используемым для принятия решений в различных сферах инженерной деятельности. Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью математических моделей (аналитических и имитационных), реализуемых на современных ЭВМ, которые в этом случае выступают в качестве инструмента для эксперимента с моделью системы [3; 4].

В каждом реальном процессе параметры в силу различных причин не остаются постоянными, причем они могут меняться в довольно широком диапазоне. Поэтому необходимо проводить анализ функционирования смоделированного процесса при изменении различных параметров.

Смазка масляным туманом представляет собой один из видов жидкой смазки. Ее применяют для быстроходных подшипников качения, цилиндров компрессоров, тихоходных цепей, трущихся пар, требующих дополнительного охлаждения, поддержания постоянной температуры или вязкости масла, в среде, разрушающей консистентные или жидкие смазки. Масляный туман способствует более эффективному охлаждению смазываемых деталей и снижению коэффициента трения. Применим он и в качестве смазочно-охлаждающей жидкости при обработке металлов резанием.

Мельчайшие частицы масла легко проникают в труднодоступные пазы, зазоры и полости и образуют масляную пленку на поверхностях трения. Существенным недостатком этого способа является только однократное применение масла. Воздух и масло, используемые для образования масляного тумана, необходимо подвергать тщательной очистке от пыли и посторонних примесей, воздух должен быть сухим.

Для избежания перегрева или, наоборот, переохлаждения паромасляной смеси на выходе из устройства мелкодисперсной смазки необходимо контролировать температуру внутри гидростанции. В данной статье рассмотрен математический расчет зависимости температуры внутри гидростанции от различных параметров и описан вывод передаточной функции по каналам управления и возмущения.

Входные контролируемые параметры:

t_{m1} — температура масла на входе;

$t_{пмс1}$ — температура паромасляной смеси на входе;

$t_{грп}$ — температура греющего пара на входе;

t_{oc} — температура окружающей среды.

Управляемые выходные параметры:

$t_{пмс2}$ — температура паромасляной смеси на выходе;

t_{m2} — конечная температура масла;

t_k — температура конденсата на выходе;



$G_{\text{пмс}2}$ – расход паромасляной смеси на выходе;

$G_{\text{к}}$ – расход конденсата на выходе;

$G_{\text{м}2}$ – расход масла на выходе.

Управляющие параметры:

$G_{\text{грп}}$ – расход греющего пара на входе;

$G_{\text{пмс}1}$ – расход паромасляной смеси на входе;

$G_{\text{м}1}$ – расход масла.

Входные неконтролируемые параметры:

i – энтальпия пара.

На рисунке 3 представлена схема параметрической модели гидро-станции.

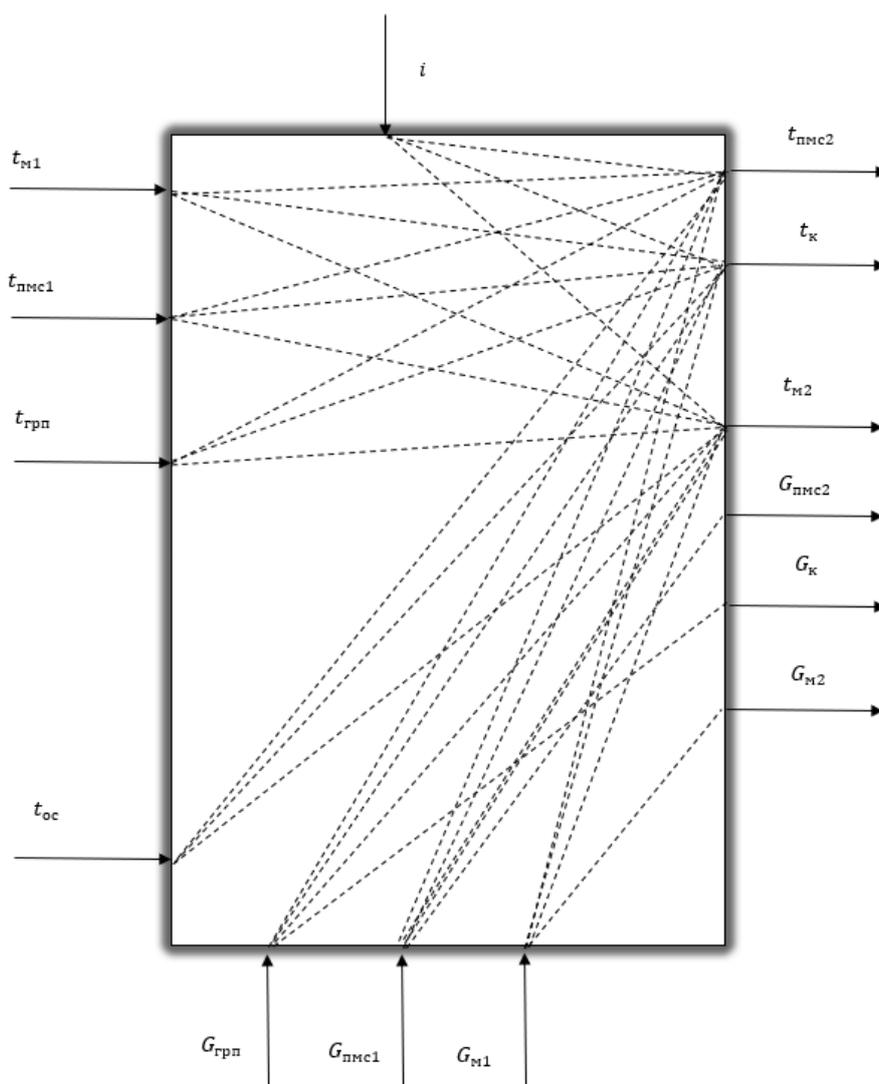


Рис. 3. Схема параметрической модели гидростанции



Разработка математической модели изменения температуры внутри гидростанции

Математическая модель изменения температуры паромасляной смеси в гидростанции представляет собой совокупность передаточных функций по основным каналам передачи информации.

Температура паромасляной смеси должна находиться в районе +25°С в зависимости от типа смазочного материала. Данное значение достигается за счет подачи греющего пара, а нагрев смеси происходит благодаря изменению расхода греющего пара на входе.

10

Для моделирования процесса изменения температуры паромасляной смеси и масла в гидростанции примем следующие допущения:

- 1) теплофизические характеристики паромасляной смеси, пара, конденсата и масла примем постоянными и равными среднему значению в рассматриваемом диапазоне величин;
 - 2) объект с сосредоточенными параметрами;
 - 3) толщина стенки гидростанции учитывается непосредственно в коэффициенте теплопередачи от паромасляной смеси к окружающей среде;
 - 4) греющий пар полностью конденсируется.
- Принимаем

$$c_{m1} = c_{m2} = c_m;$$

$$c_{пмс1} = c_{пмс2} = c_{пмс3} = c_{пмс};$$

$$G_{пмс1} = G_{пмс2} = G_{пмс3} = G_{пмс};$$

$$G_{грп} = G_k = G_n$$

Составляем уравнения теплового баланса для гидростанции в установившемся режиме работы.

1. Теплопередача от греющего пара к паромасляной смеси:

$$Q_m = G_{грп} i + G_{пмс1} c_{пмс1} t_{пмс1} \quad (\text{Дж} / \text{с}); \quad (1)$$

$$Q_{yx} = G_{пмс2} c_{пмс2} t_{пмс2} + G_k c_k t_k \quad (\text{Дж} / \text{с}). \quad (2)$$

Нарушение теплового баланса на ΔQ ведет к изменению температуры паромасляной смеси:

$$m_{пмс} c_{пмс} \frac{dt_{пмс}}{d\tau} = Q_m - Q_{yx} \quad (\text{Дж} / \text{с}); \quad (3)$$

$$G_{пмс} c_{пмс} \frac{dt_{пмс2}}{d\tau} = G_{грп} i + G_{пмс1} c_{пмс} t_{пмс1} - G_{пмс2} c_{пмс} t_{пмс2} - G_k c_k t_k \quad (\text{Дж} / \text{с}), \quad (4)$$

где $G_{пмс}$ — расход паромасляной смеси $\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$;



$c_{\text{пмс}}$ – удельная теплоемкость паромасляной смеси $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$;
 $t_{\text{пмс1}}; t_{\text{пмс2}}$ – температуры паромасляной смеси на входе и выходе установки ($^\circ\text{C}$);

$G_{\text{грп}}$ – расход греющего пара $\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$;

i – энтальпия греющего пара $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$;

$G_{\text{к}}$ – расход конденсата $\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$;

$c_{\text{к}}$ – удельная теплоемкость конденсата $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$;

$t_{\text{к}}$ – температура конденсата ($^\circ\text{C}$).

Изменяющиеся параметры:

$$Q_{\text{м}} = f(G_{\text{пмс}}, t_{\text{пмс1}}, i, G_{\text{п}});$$

$$Q_{\text{yx}} = f(G_{\text{пмс}}, t_{\text{пмс2}}, G_{\text{п}}, t_{\text{к}}).$$

Составляем уравнение в отклонениях (линеаризуем его по изменяемым параметрам), заменив $\frac{d}{dt}$ на p :

$$m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p \Delta t_{\text{пмс2}} = \Delta G_{\text{п}} i + G_{\text{п}} \Delta i + \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс1}} + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс1}} - \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} - G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс2}} - \Delta G_{\text{пк}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} - G_{\text{пк}} c_{\text{к}} \Delta t_{\text{к}}; \quad (5)$$

$$\Delta t_{\text{пмс2}} (m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}) = \Delta G_{\text{п}} i + G_{\text{п}} \Delta i + \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс1}} + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс1}} - \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} - \Delta G_{\text{пк}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} - G_{\text{пк}} c_{\text{к}} \Delta t_{\text{к}}; \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{пмс2}} = \frac{\Delta G_{\text{п}} i + G_{\text{п}} \Delta i + \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс1}} + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} \Delta t_{\text{пмс1}} - \Delta G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} - \Delta G_{\text{пк}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} - G_{\text{пк}} c_{\text{к}} \Delta t_{\text{к}}}{m_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} p + G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}}}. \quad (7)$$

2. Теплопередача от паромасляной смеси к маслу и окружающей среде:

$$Q_{\text{м}} = G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} + G_{\text{м1}} c_{\text{м}} t_{\text{м}} \quad (\text{Дж} / \text{с}); \quad (8)$$

$$Q_{\text{yx}} = G_{\text{м2}} c_{\text{м}} t_{\text{м}} + KF(t_{\text{пмс2}} - t_{\text{ос}}) + G_{\text{пмс3}} c_{\text{пмс3}} t_{\text{пмс3}} \quad (\text{Дж} / \text{с}). \quad (9)$$

Нарушение теплового баланса на ΔQ ведет к изменению температуры масла $t_{\text{м2}}$:

$$m_{\text{м}} c_{\text{м}} \frac{dt_{\text{м2}}}{d\tau} = Q_{\text{м}} - Q_{\text{yx}} \quad (\text{Дж} / \text{с}); \quad (10)$$

$$m_{\text{м}} c_{\text{м}} \frac{dt_{\text{м2}}}{d\tau} = G_{\text{пмс}} c_{\text{пмс}} t_{\text{пмс2}} + G_{\text{м1}} c_{\text{м1}} t_{\text{м1}} - KF(t_{\text{пмс2}} - t_{\text{ос}}) - G_{\text{пмс3}} c_{\text{пмс3}} t_{\text{пмс3}} \quad (\text{Дж} / \text{с}), \quad (11)$$

где $G_{\text{пмс}}$ – расход паромасляной смеси $\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$;



$c_{\text{ПМС}}$ – удельная теплоемкость паромасляной смеси $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$;
 $G_{\text{M1}}, G_{\text{M2}}$ – расход масла на входе и выходе $\left(\frac{\text{кг}}{\text{с}}\right)$;
 c_{M} – удельная теплоемкость масла $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$;
 $t_{\text{M1}}; t_{\text{M2}}; t_{\text{ПМС2}}; t_{\text{ПМС3}}; t_{\text{OC}}$ – температуры масла, ПМС и окружающей среды ($^\circ\text{C}$);
 F – площадь поверхности стенок гидростанции (м^2);
 K – коэффициент теплопередачи (от паромасляной смеси к окружающей среде) $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}\right)$.

Изменяющиеся параметры:

$$Q_{\text{M}} = f(G_{\text{M1}}, t_{\text{M1}}, t_{\text{ПМС2}});$$

$$Q_{\text{yx}} = f(G_{\text{M2}}, t_{\text{M2}}, t_{\text{ПМС3}}, t_{\text{OC}}).$$

Составляем уравнение в отклонениях (линеаризуем его по изменяемым параметрам), заменив $\frac{d}{dt}$ на p :

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{M2}}(m_{\text{M}}c_{\text{M}}p + G_{\text{M2}}c_{\text{M}}) = \\ = G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}\Delta t_{\text{ПМС2}} + \Delta G_{\text{M1}}c_{\text{M}}t_{\text{M1}} + G_{\text{M1}}c_{\text{M}}\Delta t_{\text{M1}} - \Delta G_{\text{M2}}c_{\text{M}}t_{\text{M2}} - \\ - KF\Delta t_{\text{ПМС2}} + KF\Delta t_{\text{OC}} - G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}\Delta t_{\text{ПМС3}}. \end{aligned} \quad (12)$$

3. Составляем систему уравнений и решаем ее:

$$\Delta t_{\text{ПМС2}} = \frac{\Delta G_{\text{П}}i + G_{\text{П}}\Delta i + \Delta G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}t_{\text{ПМС1}} + G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}\Delta t_{\text{ПМС1}} - \Delta G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}t_{\text{ПМС2}} - \Delta G_{\text{П}}c_{\text{K}}t_{\text{K}} - G_{\text{П}}c_{\text{K}}\Delta t_{\text{K}}}{m_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}p + G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}}; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{M2}}(m_{\text{M}}c_{\text{M}}p + G_{\text{M2}}c_{\text{M}}) = G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}\Delta t_{\text{ПМС2}} + \Delta G_{\text{M1}}c_{\text{M}}t_{\text{M1}} + G_{\text{M1}}c_{\text{M}}\Delta t_{\text{M1}} - \Delta G_{\text{M2}}c_{\text{M}}t_{\text{M2}} - \\ - KF\Delta t_{\text{ПМС2}} + KF\Delta t_{\text{OC}} - G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}\Delta t_{\text{ПМС3}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из уравнения (13) $\Delta t_{\text{ПМС2}}$ подставляем в уравнение (14):

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{M2}}(m_{\text{M}}c_{\text{M}}p + G_{\text{M2}}c_{\text{M}}) = \\ = \frac{p(\Delta G_{\text{M1}}c_{\text{M}}t_{\text{M1}} + m_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}} + G_{\text{M1}}c_{\text{M}}\Delta t_{\text{M1}} + m_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}} - \Delta G_{\text{M2}}c_{\text{M}}t_{\text{M2}} + KF\Delta t_{\text{OC}} + m_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}} - \\ - G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}) - G_{\text{П}}c_{\text{K}}\Delta t_{\text{K}} + G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}} + \Delta G_{\text{П}}i + G_{\text{П}}c_{\text{ПМС}} + G_{\text{П}}\Delta i + G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}} + \\ + \Delta G_{\text{M1}}c_{\text{M}}t_{\text{M1}} + G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}} + G_{\text{M1}}c_{\text{M}}\Delta t_{\text{M1}} + G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}} + \Delta G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}^2 t_{\text{ПМС1}} + G_{\text{ПМС}} + G_{\text{ПМС}}^2 c_{\text{ПМС}}^2 \Delta t_{\text{ПМС1}} - \\ m_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}}p + G_{\text{ПМС}}c_{\text{ПМС}} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & \frac{-\Delta G_{M2} c_M t_{M2} G_{ПМС} c_{ПМС} - \Delta G_{ПМС} c_{ПМС}^2 t_{ПМС2} G_{ПМС} - \Delta G_{П} c_K t_K G_{ПМС} c_{ПМС} - \Delta G_{П} i KF -}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}} \\
 & \frac{-G_{П} \Delta i KF - \Delta G_{ПМС} c_{ПМС} t_{ПМС1} KF - G_{ПМС} c_{ПМС} KF \Delta t_{ПМС1} + \Delta G_{ПМС} c_{ПМС} t_{ПМС2} KF + \Delta G_{П} c_K t_K KF +}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}} \\
 & \frac{+ G_{П} c_K \Delta t_K KF - KF \Delta t_{ОС} G_{ПМС} c_{ПМС} - G_{ДВС} c_{ПМС}^2 \Delta t_{ПМС3} G_{ПМС}}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}}. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Пусть $A = m_M c_M$, $B = G_{M2} c_M$, тогда преобразованное выражение будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 & \Delta t_{M2} (Ap + B) = \\
 & = \frac{p(\Delta G_{M1} c_M t_{M1} m_{ПМС} c_{ПМС} + G_{M1} c_M \Delta t_{M1} m_{ПМС} c_{ПМС} + G_{ТР} c_{ТР} \Delta t_{ТР1} m_{ПМС} c_{ПМС} - \Delta G_{M2} c_M t_{M2} m_{ПМС} c_{ПМС} +}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}} \\
 & \frac{+ KF \Delta t_{ОС} m_{ПМС} c_{ПМС} - G_{ДВС} c_{ПМС}^2 \Delta t_{ПМС3} m_{ПМС}}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}} - \frac{G_{П} c_K \Delta t_K G_{ПМС} c_{ПМС} + \Delta G_{П} i G_{ПМС} c_{ПМС} +}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}} \\
 & \frac{+ G_{П} \Delta i G_{ПМС} c_{ПМС} + \Delta G_{M1} c_M t_{M1} G_{ПМС} c_{ПМС} + G_{M1} c_M \Delta t_{M1} G_{ПМС} c_{ПМС} + \Delta G_{ПМС} c_{ПМС}^2 t_{ПМС1} G_{ПМС} +}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}} \\
 & \frac{+ G_{ПМС}^2 c_{ПМС}^2 \Delta t_{ПМС1} - \Delta G_{M2} c_M t_{M2} G_{ПМС} c_{ПМС} - \Delta G_{ПМС} c_{ПМС}^2 t_{ПМС2} G_{ПМС} - \Delta G_{П} c_K t_K G_{ПМС} c_{ПМС} -}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}} \\
 & \frac{-\Delta G_{П} i KF - G_{П} \Delta i KF - \Delta G_{ПМС} c_{ПМС} t_{ПМС1} KF - G_{ПМС} c_{ПМС} KF \Delta t_{ПМС1} + \Delta G_{ПМС} c_{ПМС} t_{ПМС2} KF +}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}} \\
 & \frac{+ \Delta G_{П} c_K t_K KF + G_{П} c_K \Delta t_K KF - KF \Delta t_{ОС} G_{ПМС} c_{ПМС} - G_{ДВС} c_{ПМС}^2 \Delta t_{ПМС3} G_{ПМС}}{m_{ПМС} c_{ПМС} p + G_{ПМС} c_{ПМС}}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

Передаточная функция – это отношение изображения Лапласа переменной на выходе к изображению Лапласа переменной на входе. В данной статье в качестве выходного параметра принята регулируемая величина Δt_{M2} .

Рассматриваем канал по управлению:

Изменение конечной температуры масла – изменение расхода греющего пара ($\Delta t_{M2} - \Delta G_{П}$):

$$\begin{aligned}
 \Delta t_{M2} (Ap + B) &= \Delta G_{П} (i G_{ПМС} c_{ПМС} - c_K t_K G_{ПМС} c_{ПМС} + c_K t_K KF); \\
 \frac{\Delta t_{M2}}{\Delta G_{П}} &= \frac{i G_{ПМС} c_{ПМС} - c_K t_K G_{ПМС} c_{ПМС} + c_K t_K KF}{Ap + B} = \frac{k_1}{Ap + B}, \quad (17)
 \end{aligned}$$

где $k_1 = i G_{ПМС} c_{ПМС} - c_K t_K G_{ПМС} c_{ПМС} + c_K t_K KF$.



Рассматриваем канал по возмущению:

1. Изменение конечной температуры масла – Изменение расхода масла ($\Delta t_{m2} - \Delta G_m$):

$$\Delta t_m (Ap + B) = \Delta G_{m1} (c_m t_{m1} m_{пмс} c_{пмс} p + c_m t_{m1} G_{пмс} c_{пмс});$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta G_m} = \frac{c_m t_{m1} m_{пмс} c_{пмс} p + c_m t_{m1} G_{пмс} c_{пмс}}{Ap + B} = \frac{T_1 p + k_2}{Ap + B}, \quad (18)$$

где $k_2 = c_m t_{m1} G_{пмс} c_{пмс}$, $T_1 = c_m t_{m1} m_{пмс} c_{пмс}$.

2. Изменение конечной температуры масла – Изменение начальной температуры масла ($\Delta t_{m2} - \Delta t_{m1}$):

$$\Delta t_m (Ap + B) = \Delta t_{m1} (G_{m1} c_m m_{пмс} c_{пмс} p + G_{m1} c_m G_{пмс} c_{пмс});$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_{m1}} = \frac{G_{m1} c_m m_{пмс} c_{пмс} p + G_{m1} c_m G_{пмс} c_{пмс}}{Ap + B} = \frac{T_2 p + k_3}{Ap + B}, \quad (19)$$

где $k_3 = G_{m1} c_m G_{пмс} c_{пмс}$, $T_2 = G_{m1} c_m m_{пмс} c_{пмс}$.

3. Изменение конечной температуры масла – Изменение расхода паромасляной смеси ($\Delta t_{m2} - \Delta G_{пмс}$):

$$\Delta t_{m2} (Ap + B) = \Delta G_{пмс} (c_{пмс}^2 t_{пмс1} G_{пмс} - c_{пмс}^2 t_{пмс2} G_{пмс} + c_{пмс} t_{пмс2} KF);$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta G_{пмс}} = \frac{c_{пмс}^2 t_{пмс1} G_{пмс} - c_{пмс}^2 t_{пмс2} G_{пмс} + c_{пмс} t_{пмс2} KF}{Ap + B} = \frac{k_4}{Ap + B}, \quad (20)$$

где $k_4 = c_{пмс}^2 t_{пмс1} G_{пмс} - c_{пмс}^2 t_{пмс2} G_{пмс} + c_{пмс} t_{пмс2} KF$.

4. Изменение конечной температуры масла – Изменение начальной температуры паромасляной смеси ($\Delta t_{m2} - \Delta t_{пмс1}$):

$$\Delta t_{m2} (Ap + B) = \Delta t_{пмс1} (G_{пмс}^2 c_{пмс}^2 - G_{пмс} c_{пмс} KF);$$

$$\frac{\Delta t_{m2}}{\Delta t_{пмс1}} = \frac{G_{пмс}^2 c_{пмс}^2 - G_{пмс} c_{пмс} KF}{Ap + B} = \frac{k_5}{Ap + B}, \quad (21)$$

где $k_5 = G_{пмс}^2 c_{пмс}^2 - G_{пмс} c_{пмс} KF$.

5. Изменение конечной температуры масла – Изменение окружающей среды ($\Delta t_{m2} - \Delta t_{oc}$):

$$\Delta t_{m2} (Ap + B) = \Delta t_{oc} (KF m_{пмс} c_{пмс} p - KFG_{пмс} c_{пмс});$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_{oc}} = \frac{KF m_{пмс} c_{пмс} p - KFG_{пмс} c_{пмс}}{Ap + B} = \frac{T_3 p + k_6}{Ap + B}, \quad (22)$$

где $T_3 = KF m_{пмс} c_{пмс}$, $k_6 = -KFG_{пмс} c_{пмс}$.



6. Изменение конечной температуры продукта – Изменение энтальпии греющего пара ($\Delta t_{m2} - \Delta i$):

$$\Delta t_{m2} (Ap + B) = \Delta i (G_{II} G_{IIIC} c_{IIIC} - G_{II} KF);$$

$$\frac{\Delta t_{m2}}{\Delta t_{c1}} = \frac{G_{II} G_{IIIC} c_{IIIC} - G_{II} KF}{Ap + B} = \frac{k_8}{Ap + B}. \quad (23)$$

Разработка блок-схемы алгоритма управления линии производства металлочерепицы

Для разработки программного обеспечения линии производства металлочерепицы была разработана блок-схема алгоритма [5], представленная на рисунке 4.

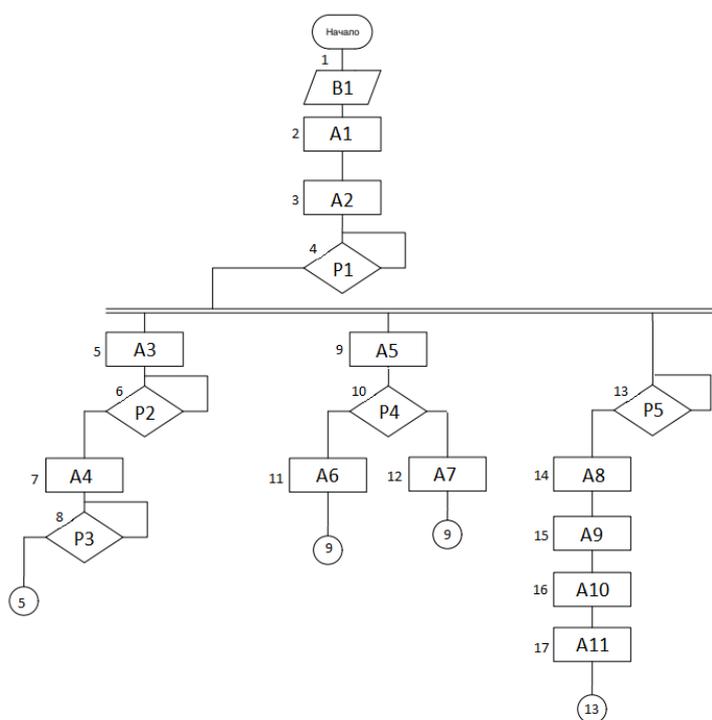


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления линии

После подачи питания в систему оператор вводит необходимые параметры (1). Далее происходит включение размотчика (2) и включение привода для ввода металла (3). Система готова к запуску в автоматическом режиме. Происходит включение системы автоматического регулирования (4).

Размотчик выключается (5). Если уровень натяжения металла превышает допустимое значение (6), размотчик включается снова (7). Далее происходит проверка уровня натяжения металла (8) и, в случае превышения, выключение размотчика снова (5).



Параллельно с этим происходит продув выходов смазки и подготовка ко включению разбрызгивателя (9). Если стан включен (10), происходит разбрызгивание смазки на металл (11). Данное действие выполняется, пока стан включен. Если стан выключен (10), то подача смазки прекращается (12) и происходит повторная проверка (9).

Стан работает только тогда, когда датчик на выходе показывает, что длина готовой продукции недостаточна (13). Если длины достаточно, стан выключается (14), происходит опускания ножа (15), поднятие ножа (16) и повторное включение стана (17) с возвратом к проверке длины готовой продукции (13).

Разработка программного обеспечения для автоматизированной линии производства металлочерепицы

В качестве ПЛК для реализации был выбран ПЛК160 от компании «ОВЕН» (рис. 5).

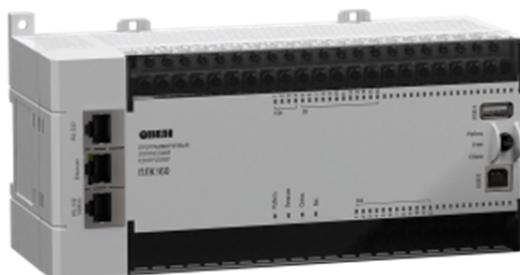


Рис. 5. Программируемый логический контроллер ПЛК160 [6]

На основе блок-схемы алгоритма, представленной в предыдущем разделе, разработано ПО для линии в среде CoDeSyS v2.3.

Были заданы глобальные переменные (рис. 6).

```
Global_Variables
0001 VAR_GLOBAL
0002   Vkluchenie_razmat: BOOL;
0003   Vkluchenie_stanok: BOOL;
0004   NOZH_opuchen: BOOL;
0005   Vkluchenie_privod: BOOL;
0006   Vkluchenie_podachi_smazki: BOOL;
0007   Produv_vyhodov_smazki: BOOL;
0008   Zadanaya_dlyna: INT;
0009   Tekuschaya_dlyna: INT;
0010   Vkluchenie_sistemy: BOOL;
0011   Auto_rezhim: BOOL;
0012   Ruchnoi_rezhim: BOOL;
0013   SYSTEMA_ON: BOOL;
0014   Kol: INT;
0015   Zadannoe_kolichestvo_detaley: INT;
0016   Sbro: BOOL;
0017 END_VAR
```

Рис. 6. Область описания переменных



На рисунке 7 представлены фрагменты кода программы — соответственно ее начало и конец.

0001	SYSTEMA_ON:=TRUE;	0022	IF Vkluchenie_razmat=TRUE THEN
0002	Sbros:=FALSE;	0023	IF Vkluchenie_stanok=TRUE THEN
0003	Auto_rezhim:=FALSE;	0024	Produv_vyhodov_smazki:=TRUE;
0004	Ruchoi_rezhim:=TRUE;	0025	timer(IN:= NOT timer.Q, PT:=T#1s);
0005	Vkluchenie_razmat:=FALSE;	0026	IF timer.Q
0006	Vkluchenie_privod:=FALSE;	0027	THEN
0007	Vkluchenie_stanok:=FALSE;	0028	iReg:=iVar;
0008	NOZH_opuchen:=FALSE;	0029	END_IF
0009	Produv_vyhodov_smazki:=FALSE;	0030	Produv_vyhodov_smazki:=FALSE;
0010	Vkluchenie_podachi_smazki:=FALSE;	0031	Vkluchenie_privod:=TRUE;
0011	Zadanaya_dlyna:=0;	0032	IF Sbros=TRUE THEN
0012	Tekuschaya_dlyna:=0;	0033	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;
0013	Kolichestvo_detaley:=0;	0034	Zadanaya_dlyna:=0;
0014	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;	0035	Kolichestvo_detaley:=0;
0015	IF SYSTEMA_ON=TRUE THEN	0036	Tekuschaya_dlyna:=0;
0016	IF Sbros=TRUE THEN	0037	END_IF
0017	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;	0038	END_IF
0018	Zadanaya_dlyna:=0;	0039	END_IF
0019	Kolichestvo_detaley:=0;	0040	
0020	Tekuschaya_dlyna:=0;	0041	IF Auto_rezhim=TRUE THEN
0021	END_IF	0042	IF Sbros=TRUE THEN
		0043	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;

17

a

0044	Zadanaya_dlyna:=0;	0067	Tekuschaya_dlyna:=0;
0045	Kolichestvo_detaley:=0;	0068	END_IF
0046	Tekuschaya_dlyna:=0;	0069	END_IF
0047	END_IF	0070	END_IF
0048	REPEAT	0071	
0049	Vkluchenie_razmat:=TRUE;	0072	
0050	Vkluchenie_privod:=TRUE;	0073	IF Sbros=TRUE THEN
0051	Vkluchenie_stanok:=TRUE;	0074	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;
0052	IF Tekuschaya_dlyna=Zadanaya_dlyna THEN	0075	Zadanaya_dlyna:=0;
0053	Vkluchenie_razmat:=FALSE;	0076	Kolichestvo_detaley:=0;
0054	Vkluchenie_privod:=FALSE;	0077	Tekuschaya_dlyna:=0;
0055	Vkluchenie_stanok:=FALSE;	0078	END_IF
0056	NOZH_opuchen:=TRUE;		
0057	NOZH_opuchen:=FALSE;		
0058	Kolichestvo_detaley:=Kolichestvo_detaley+1;		
0059	END_IF		
0060	UNTIL Kolichestvo_detaley=Zadannoe_kolichestvo_detaley		
0061			
0062	END_REPEAT		
0063	IF Sbros=TRUE THEN		
0064	Zadannoe_kolichestvo_detaley:=0;		
0065	Zadanaya_dlyna:=0;		

b

Рис. 7. Фрагменты кода программы:
a — начало; б — конец



На рисунке 8 показана мнемосхема производственной линии [7].

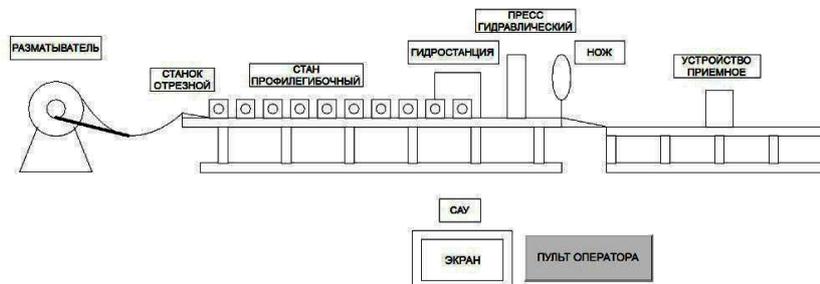


Рис. 8. Мнемосхема производственной линии

Для управления линией с компьютера используется панель оператора, настроенная, как показано ниже на рисунке 9.

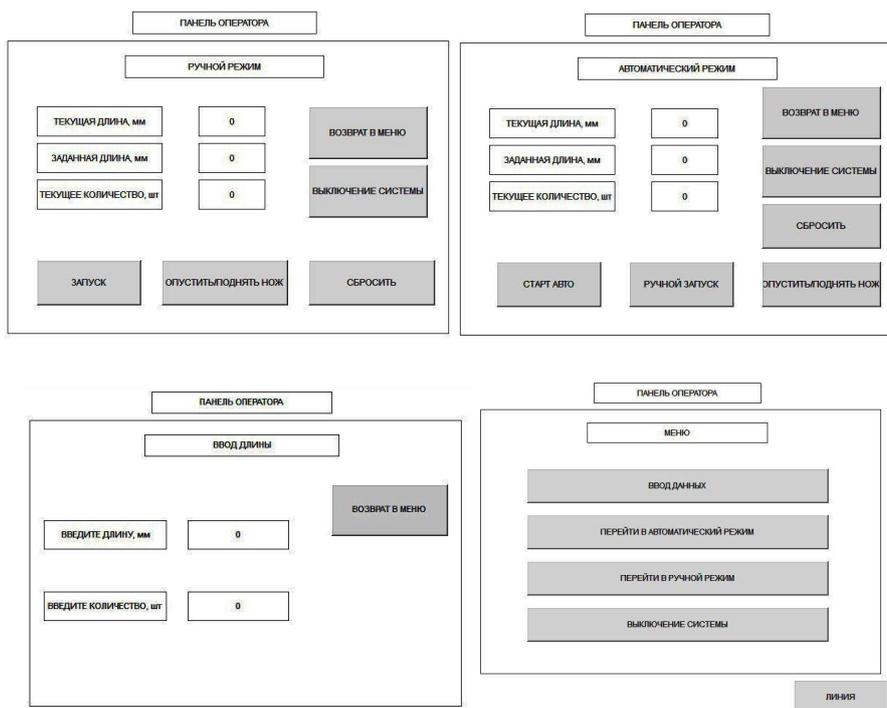


Рис. 9. Фрагменты графического интерфейса панели оператора

Для панели оператора СП310-Р от компании «ОВЕН» был разработан графический интерфейс в специальной программе «Конфигуратор СП300», который дублирует графический интерфейс в среде CoDeSyS v2.3. Внешний вид панели оператора представлен на рисунке 10, полный графический интерфейс для панели оператора – на рисунке 11.



Рис. 10. Внешний вид панели оператора

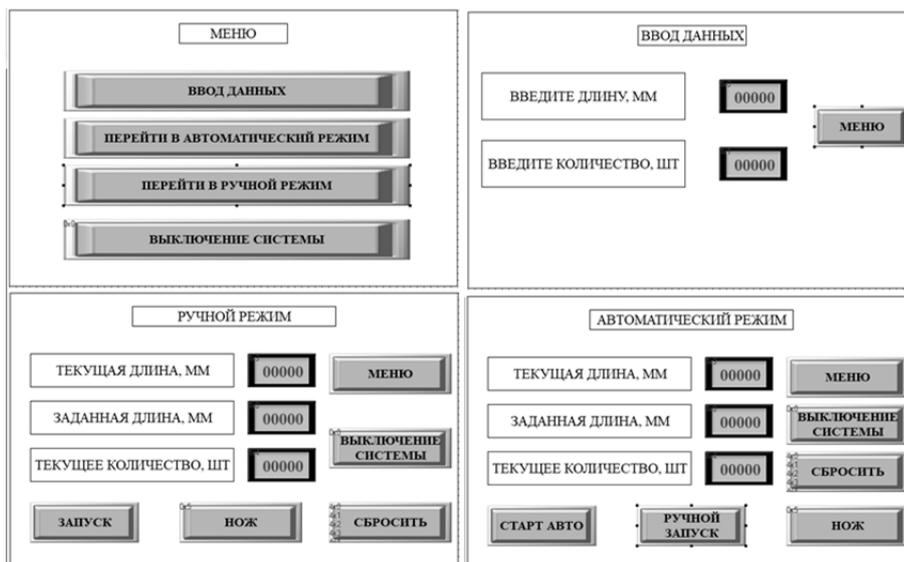


Рис. 11. Полный графический интерфейс для панели оператора

Выводы

В результате работы была обновлена линия производства металлочерепицы: заменены ПЛК и графическая панель оператора, смоделирован процесс изменения температуры внутри гидростанции, разработано программное обеспечение для обновленной линии. Данные результаты работы полностью удовлетворяют поставленным задачам и могут быть использованы на других линиях.



Список литературы

1. Смазка масляным туманом. URL: <http://for-engineer.info/lubricate/smazka-maslyanym-tumanom.html> (дата обращения: 01.04.2021).
2. Оборудование для производства металлочерепицы. URL: <http://znp.lipetsk.ru/m1.htm> (дата обращения: 02.04.2021).
3. Сердобинцев С.П. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии : учеб. пособие. Калининград, 2006.
4. Будченко Н.С., Коган А.П. Управление техническими системами и процессами : учеб.-метод. пособие по курсовой работе для студентов бакалавриата по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование». Калининград, 2015.
5. ГОСТ 21.404-85. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. Утв. 18.04.1985. М., 1986.
6. ОВЕН. Оборудование для автоматизации : [официальный сайт]. URL: <http://www.owen.ru/> (дата обращения: 01.04.2021).
7. Оборудование, применяемое в производстве металлочерепицы. URL: <https://promzn.ru/stanki-i-oborudovanie/primenyuемое-v-proizvodstve-metallocherepitsy.html> (дата обращения: 24.04.2021).

Об авторах

Михаил Андреевич Романов — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: mikhail.romanov@baltacademcenter.ru

Олег Владимирович Толстель — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: tolstel.oleg@mail.ru

The authors

Mikhail A. Romanov, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: mikhail.romanov@baltacademcenter.ru

Dr Oleg V. Tolstel, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: tolstel.oleg@mail.ru

К. Б. Билык, С. Н. Ткаченко, А. В. Бодня

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИВЛЕЧЕНИЯ КЛИЕНТОВ ДЛЯ ПЛАТНЫХ SaaS-РЕШЕНИЙ

Поступила в редакцию 08.04.2021 г.

Рецензия от 25.04.2021 г.

Рассмотрены различные аспекты привлечения клиентов к использованию SaaS-решений от компании X. В качестве тестового решения рассмотрена рекламная кампания, направленная на регион Латинской Америки. На основе полученных данных построена математическая модель, которая показала наиболее слабые места в рекламной кампании и легла в основу оценки ее эффективности. Это позволило скорректировать процесс привлечения клиентов и повысить его результативность.

The paper considers various aspects of attracting customers to use SaaS solutions from company X. As a test solution, an advertising company aimed at the Latin American region was considered. Based on the obtained data, a mathematical model was built that showed the most "weak" points in the advertising company and allowed us to evaluate its effectiveness. As a result, the process of attracting customers was adjusted, and its effectiveness was increased.

Ключевые слова: CRM-система, SaaS-решение, математическая модель, линейные модели

Keywords: CRM system, SaaS solution, mathematical model, linear models

Введение

SaaS (англ. software as a service – программное обеспечение как сервис) подразумевает использование клиентом приложений, развернутых на платформе провайдера [1]. Клиентами данной модели обслуживания, как правило, становятся частные лица, которые пользуются различными сервисами: электронной почтой, онлайн-кинотеатром, облачным хранилищем файлов малого объема, мессенджером и т.д. Социальные сети также работают по модели SaaS. Формат SaaS широко используется как основа для платформы по строительству сайтов. Иногда поставщик такой услуги может не только предоставить своему заказчику необходимое для создания сайта программное обеспечение, но и помочь разместить готовый сайт на хостинге [2].

Корпоративные клиенты SaaS-провайдеров используют приложения для видеоконференций, ERP- и CRM-систем, систем автоматизации бизнес-процессов, приложений для управления проектами и тайм-менеджмента, сервисов электронной почты и т.д. Примерами SaaS-решений могут служить Gmail, LiveJournal, Jira, Confluence, Bitrix, WordPress, Citrix и др.



Основная идея SaaS состоит в том, что клиент платит за пользование сервисом так долго, насколько это возможно. На сегодняшний день программное обеспечение продается в основном по подписке, интегрируясь с маркетплейсом, в котором находится множество приложений [3]. Организации могут пользоваться сервисом, не прибегая к помощи отделов управления проектами или ИТ, не устанавливая на свои серверы ресурсозависимые приложения, к примеру ERP-системы. Поскольку клиент видит свою экономию на оборудовании и других аспектах использования приложений, он начинает платить за подобную услугу. Прежде всего его выгода заключается в удобстве использования и широком функционале, который предлагается компаниями-поставщиками. Также у клиента всегда есть возможность ухода с платной подписки.

В данной статье в качестве SaaS-услуги рассматривается платная подписка компании X на CRM-решение [4]. Цель статьи — математическое моделирование социально-экономического процесса потребления программного продукта Bitrix24 на платной основе.

Анализ причин ухода клиентов с платной подписки

Приобретение платного тарифа рассматривается нами как целевое действие пользователя, завершающее указанный процесс. Классический путь к платной подписке начинается со знакомства предполагаемого клиента с рекламным предложением и заканчивается оформлением платного доступа к CRM Bitrix24. На этом пути клиент может проходить несколько стадий, каждая из которых отмечена уменьшением количества потенциальных покупателей информационной системы.

Для моделирования процесса привлечения клиентов к программному продукту Bitrix24 необходимо понять, почему клиенты не доходят до платной подписки или уходят с нее на бесплатную версию.

В ходе опросов клиентов компании X были выявлены основные причины неиспользования платной подписки или ухода с нее.

1. Часто клиенты отмечают автопродление текущей подписки для того, чтобы перейти на другой тариф или поменять тип платежного средства либо реквизиты компании. В таких случаях отмена подписки — вынужденная мера, необходимая для того, чтобы потом купить ее снова.
2. Клиенту сложно пользоваться продуктом.
3. Клиенту не хватает каких-либо дополнительных деталей, инструментов.
4. Клиент недоволен уровнем технической или клиентской поддержки (скоростью ответа / решением проблемы).
5. Клиенту достаточно инструментов в бесплатной подписке.
6. Завершение проекта, для которого использовались SaaS-решения, и, следовательно, отсутствие необходимости в дальнейшем использовании CRM-системы.
7. Слишком высокая стоимость продукта.
8. Другие причины (к этой причине при отключении подписки появляется окошко с ручным указанием причины).



Как видно, ряд причин носит объективный характер (например, окончание проекта), и, следовательно, количество клиентов, которые пользуются платной подпиской, будет существенно меньше исходного количества людей, охваченных в рамках рекламной компании.

Предпосылки модели

Основной способ продвижения SaaS и привлечения новых клиентов — это качественное обслуживание имеющихся клиентов и работа с новыми пользователями через рекламные каналы.

Потребности клиента можно удовлетворить, создав программное обеспечение, отвечающее всем его запросам (или их большей части). Соответственно, необходимо правильно обращаться к клиенту, предоставлять широкий спектр ИТ-услуг и приложений, предлагать помощь и поддержку в работе. Если пользователю нравится программный продукт, он может по рекомендации привести новых клиентов.

Чтобы новый клиент оставался доволен продуктом и различными аспектами его использования, следует уделять много времени опросам и анализировать опыт работы клиентов с программным обеспечением, а затем выдавать решение и рекламную стратегию в зависимости от их потребностей, чтобы охватить как можно большую аудиторию. В этом случае необходима комплексная работа с клиентами, особенно с теми, кто находится на бесплатном тарифе, поскольку они относятся к категории «теплых». У них есть рекомендации от знакомых, они могут протестировать бесплатный функционал, и остается последний шаг — принять решение о покупке подписки на данное SaaS-решение.

Основная стратегия привлечения клиентов на платные тарифы, развития маркетинга и продаж в SaaS-решениях такова:

- периодически делать по электронной почте рассылки клиентам, которые находятся на пробном периоде;
- установить гибкий пробный период с возможностью продления;
- улучшать функции, которые имеют значение.

Однако эти действия не всегда эффективны, потому что важно концентрироваться на людях, а не на функциях программного обеспечения. Продукт используют именно люди, и разным пользователям требуются различные функции. Поэтому необходимо рассмотреть процесс привлечения клиентов не с точки зрения компании, а с точки зрения потенциального клиента. Новый клиент, еще не зная всех преимуществ продукта, скорее прислушается к рекламе, которая вызывает доверие, или к своим знакомым, рекомендующим продукт.

Разработка модели

С точки зрения клиента для изменения бизнес-процесса необходимо задать следующие основные стратегии:

1. Концентрация на людях, а не на продукте. Необходимо решать задачи своей целевой аудитории, осуществлять индивидуальный подход к клиентам еще до того, как они приобрели подписку.



2. Анализ этапов воронки продаж при продвижении сделок.
3. Экспертное общение от лица бренда.
4. Привлечение трафика на сайт (каналы рекламы).

5. Бесплатные пробные периоды. Компания X не предоставляет пробные периоды, однако есть бессрочный бесплатный период пользования продуктом, с ограниченным функционалом. Это удобное решение, так как потенциальный клиент, протестировав базовые функции бесплатного тарифа, сможет легче принять решение о покупке подписки, лучше понять продукт изнутри и даже на время включить режим демоподписки, в котором есть все функции, присутствующие в самой дорогой подписке.

При создании математической модели мы понимаем, что клиенты приходят из рекламных каналов, в частности через таргетированную рекламу. Применительно к компании X мы рассмотрели таргетированную рекламу в социальной сети Facebook. Подобный вид рекламы хорошо подходит для анонсирования и размещения вебинаров, позволяет сделать таргетинг по должностям и привлечь руководителей крупных компаний. Необходимо также упомянуть, что речь идет о западном рынке, к которому относятся различные континенты и страны. Было выявлено, что рекламный кабинет Facebook Ads хорошо работает на регион Латинской Америки, так как значительная часть его населения проводит свое время именно в данной социальной сети.

Для привлечения клиентов из этого региона была запущена таргетированная реклама с анонсированием и проведением обучающих вебинаров по ПО Bitrix24 на испанском языке.

Через систему сквозной аналитики были получены следующие данные для моделирования:

- все источники переходов в цифрах – не только рекламные каналы, но и отдельные объявления и даже ключевые запросы, по которым сразу видно, какие способы продвижения и кампании окупаются, а какие – нет;
- информация о том, на каком этапе воронки продаж сделки срываются чаще, что позволит исправить ошибки и увеличить прибыль;
- информация о стоимости каждого клика или целевой заявки, которая показывает, окупается ли продвижение.

В результате было установлено, что в процессе перехода к платной подписке пользователь проходит через пять стадий с момента получения рекламных материалов до оформления подписки. На каждом этапе теряется некоторое количество потенциальных клиентов.

Исходное количество людей было взято за единицу, количество людей на каждом последующем этапе измерялось в долях от единицы (таким образом, была проведена нормировка данных). Нормировка дает возможности для сравнения различных компаний друг с другом.

Далее полученные данные были прологарифмированы, что позволило приблизительно описать их при помощи линейных функций.

Результаты первичной модели представлены на рисунке 1.

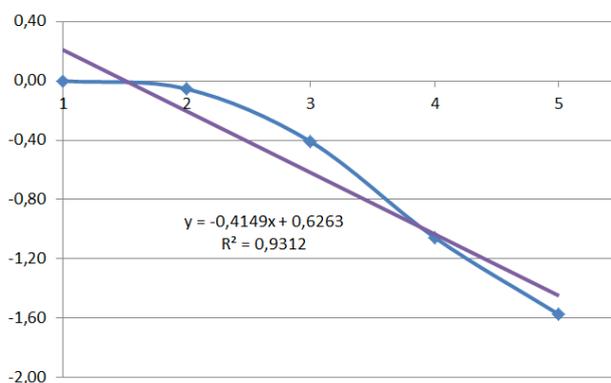


Рис. 1. Результаты первичной модели

Как видно из рисунка 1, сначала отсев небольшой, но потом происходит значительное снижение числа людей. Угловым коэффициентом y линейной зависимости, описывающей экспериментальную кривую, равен $-0,4149$. Если удастся его понизить, мы получим более эффективное развитие рекламной компании. Также видно, что большое количество людей на стадиях 2 и 3 («Прошедшие спам-фильтр» и «Прошедшие по ссылке») не гарантирует большого количества людей, которые в итоге оформят платную подписку.

За счет корректировки этих двух этапов, а именно снижения людей на каждом из них, но при этом более адресной работы на 4-й и 5-й стадиях (связанных уже с работой с самим программным продуктом), удалось получить улучшенный результат, который представлен на рисунке 2.

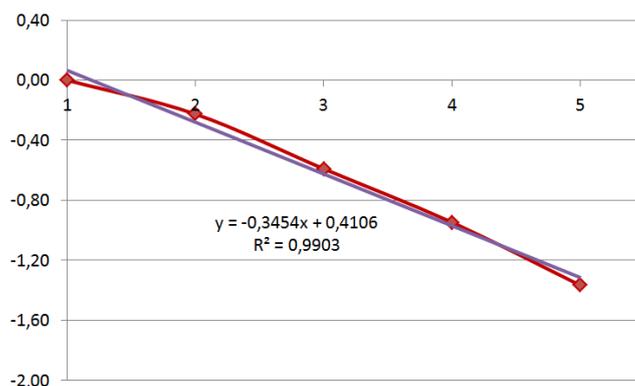


Рис. 2. Результаты модифицированной модели

Мы видим, что удалось уменьшить абсолютное значение углового коэффициента (до $-0,3454$). Это означает, что платную подписку оформило большее количество людей. Прирост составил 23%. Подобный результат говорит о правильности принятых решений по внесению изменений в рекламную кампанию.



Выводы

В данной работе на основе проведенной рекламной кампании была построена математическая модель, описывающая процесс привлечения клиентов для платных подписок на CRM-систему Bitrix24. Показана возможность применения подобных моделей для внесения изменений в рекламную кампанию и повышения ее эффективности.

Список литературы

26

1. Mäkilä T., Järvi A., Rönkkö M., Nissilä J. How to Define Software-as-a-Service – An Empirical Study of Finnish SaaS Providers // Tyrväinen P., Jansen S., Cusumano M. A. (eds.). Software Business. ICSOB 2010 : Proceedings. Springer, 2010 (Lecture Notes in Business Information Processing, vol. 51). doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-13633-7_10.
2. Kulkarni G.F., Gambhir J., Palwe R. Cloud Computing-Software as Service // International Journal of Computer Science & Information Technology Research Excellence. 2012. Vol. 2, iss. 1.
3. Turner B. What is SaaS? Everything you need to know about Software as a Service. TechRadar.pro. 15.12.2019.
4. Customer Relationship Management (CRM). URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/customer-relationship-management-crm> (дата обращения: 31.03.2021).

Об авторах

Кристина Борисовна Билык – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: bilykkristina@gmail.com

Сергей Николаевич Ткаченко – канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: tkasergey@yandex.ru

Александр Владимирович Бодня – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: ABodnya@kantiana.ru

The authors

Kristina B. Bilyk, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: bilykkristina@gmail.com

Dr Sergey N. Tkachenko, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: tkasergey@yandex.ru

Alexander V. Bodnya, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: ABodnya@kantiana.ru

М. В. Головенко, О. В. Толстель, Д. В. Михеенко

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ НА КАРТЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Поступила в редакцию 04.05.2021 г.

Рецензия от 22.05.2021 г.

В настоящее время во всех отраслях производства заметна тенденция автоматизирования всех процессов, в частности внутренней логистики. Для оптимального использования автоматизированных или автоматических транспортных средств требуется решать задачу поиска оптимальных маршрутов на карте с препятствиями. В статье рассмотрено написание программы для поиска таких маршрутов в среде программирования Microsoft Visual Studio с использованием языка C#.

The tendency to automate all processes, in particular internal logistics, is now evident in all branches of production. The optimal use of automated or automated vehicles requires solving the problem of finding optimal routes on a map with obstacles. The article deals with writing a program for finding such routes in the Microsoft Visual Studio programming environment using the C# language.

Ключевые слова: оптимальный путь, построение маршрута, карта с препятствиями, волновой алгоритм, компьютерная программа, C#

Key words: optimal way, route construction, map with obstacles, wave algorithm, computer software, C#

Маршрут (англ. *route*) – путь следования объекта, учитывающий направление движения относительно ориентиров или координат, с указанием начальной, конечной и промежуточных точек (в случае их наличия). Маршрут из точки А в точку Б называется *оптимальным*, если он удовлетворяет выбранному критерию оптимальности (например, длина, время в пути, количество поворотов и др.) [1].

ООО «Автотор» – один из крупнейших автопроизводителей России, первым в стране начавший выпуск автомобилей иностранных марок [2]. Для автоматизации доставок в цехах «Автотора» используются автоматически управляемые тележки, которые двигаются по заданным маршрутам.

Для контроля за всем автоматически управляемым транспортом (Automatic Guided Vehicle – AGV) в цеху существует логистическая система – программа, управляющая логистикой цеха в реальном времени. Она имеет доступ к карте цеха, передвижных стоек с инструментами, особых зон и др. Автоматизированные тележки постоянно передают свои данные, такие как положение, скорость, состояние загрузки, в эту систему.



При необходимости доставить груз из одной точки в другую система назначает на это действие свободную тележку, формирует файл на создание маршрута перемещения, составляет маршрут доставки и передает его на выбранное транспортное средство, контролирует выполнение доставки. Каждую из функций выполняет отдельная подпрограмма, и результат каждой подпрограммы важен.

Однако самое большое влияние на всю перевозку оказывает маршрут [3]. Даже самая быстрая тележка при неправильном построении пути доставит груз позднее, чем медленный AGV, движущийся по самому оптимальному плану.

Для лучшего использования ресурсов предприятия и минимизации простоев оборудования требуется найти и использовать самые оптимальные маршруты доставки [1]. Решение данной задачи зависит от выбранного алгоритма поиска пути.

Существует несколько факторов, оценка которых дает ответ на вопрос, минимален ли полученный путь. Каждый фактор по-разному влияет на минимизацию расходов при производстве. Выбор приоритетного фактора также должен быть рассчитан.

В случае с доставкой деталей для сборки с использованием АТС критерием оптимальности будем считать длину маршрута, которая в конечном итоге сказывается на времени выполнения операции.

Рассмотрим задачу нахождения пути на карте с препятствиями с использованием языка программирования C#. Целью является написание программы на языке C#, которая находит оптимальный путь на карте с препятствиями, чтобы в дальнейшем использовать эту программу для решения задачи доставки.

Будем использовать следующие инструменты:

- Microsoft Visual Studio – интегрированная среда разработки от Microsoft [4] с поддержкой многих языков программирования, в частности C#;
- AutoCAD – система автоматизированного проектирования и черчения, с помощью которой можно создавать входные карты с препятствиями;
- FastStone Image Viewer – многофункциональная программа для просмотра изображений (или другая программа такого же функционала для просмотра полученных результатов);
- встроенные в среду разработки библиотеки, которые необходимы для выполнения расчетов.

Разработка интерфейса

Создание приложения началось с разработки интерфейса. Большая часть окна, порядка 75 % всей площади, было выделено под рабочую область, в которой отображается чертеж.

Меню программы вынесено в правую сторону окна и занимает приблизительно 20 % от всего пространства программы. Действиями в данном меню пользователь управляет всей программой, открывает чертежи, рассчитывает карту весов и строит маршруты.



Блок ниже, которому отведено около 4–5 % площади интерфейса, выделен для подсказок. В нем содержится информация о текущем состоянии программы и ожидаемом действии. Также в него выводятся подсказки при наведении на элементы управления.

Макет интерфейса программы в упрощенном виде представлен на рисунке 1.

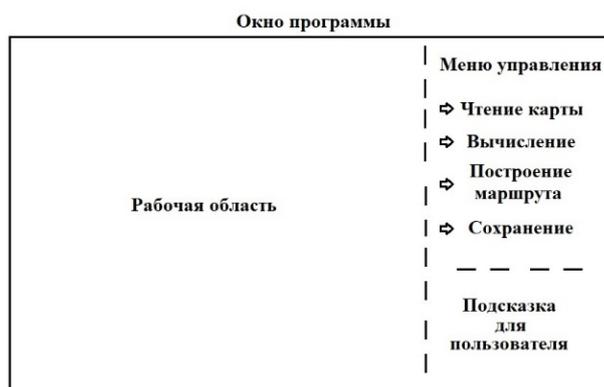


Рис. 1. Макет интерфейса программы

Для создания подобного интерфейса в Microsoft Visual Studio использовались следующие стандартные элементы управления:

- кнопки Button для взаимодействия пользователя с программой;
- контейнеры GroupBox для создания информационных блоков и быстрого управления интерфейсом;
- поля Label для вывода подсказок в соответствующие поля в окне программы;
- контейнер PictureBox для отображения чертежа на экране [5].

Получившееся стартовое окно программы показано на рисунке 2.

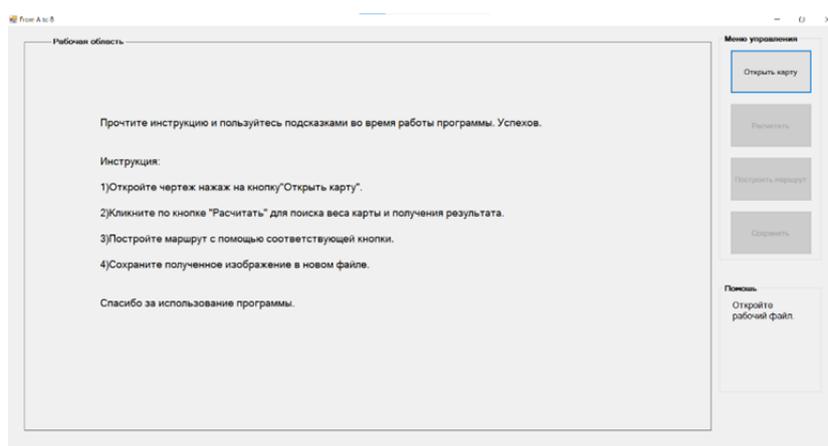


Рис. 2. Стартовое окно программы



Импорт библиотек

Перед началом необходимо импортировать все библиотеки и коллекции элементов, необходимые для написания алгоритмов и их выполнения. При написании программы использовались только встроенные в систему Windows библиотеки, что позволяет беспрепятственно запускать полученное приложение на компьютерах с такой операционной системой. Перечислим их: System; System.Collections.Generic; System.ComponentModel; System.Data; System Drawing; System.IO; System.Linq; System.Text; System.Threading.Tasks; System.Windows.Forms.

30

Открытие карты

Многие компьютерные программы для создания чертежей, например AutoCAD, Компас, nanoCAD, имеют возможность сохранять чертежи в форматах изображений bmp, png, jpg. Использование специализированных форматов, таких как dwg для AutoCAD, лишь усложнит задачу, так как файлы такого формата содержат дополнительные характеристики, не требуемые в задаче.

К входным чертежам были установлены строгие критерии. Черным цветом показываются непреодолимые препятствия (стены, пешеходные зоны), которые нельзя пересекать, и различные другие препятствия. Прямоугольником зеленого цвета на рисунке должно быть отмечено транспортное средство, для которого строится путь, причем размеры должны соответствовать масштабу схемы. Зона доставки на входном изображении отмечается красным прямоугольником. Фон изображения — белый. Любые другие цвета на входном файле будут рассматриваться как свободные к перемещению позиции.

Для чтения карты из файла в программе прописан вызов диалогового окна, в котором пользователь посредством проводника Windows выбирает изображение, хранящееся на компьютере и подходящее под фильтр форматов. Такое окно показано на рисунке 3.

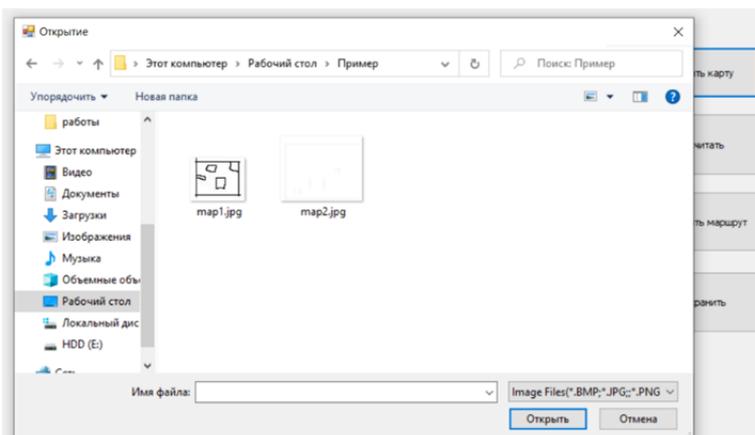


Рис. 3. Открытие файла



В коде программы вызов диалогового окна привязан к нажатию соответствующей кнопки в меню управления. Также сделана проверка на корректность открытия файла. Фрагмент кода представлен на рисунке 4.

```
ссылка: 1
private void OpenFileButton_Click(object sender, EventArgs e) //Открытие файла
{
    OpenFileDialog open_dialog = new OpenFileDialog();
    open_dialog.Filter = "Image Files (*.BMP;*.JPG;*.PNG)|*.BMP;*.JPG;*.PNG|All files (*.*)|*.*";
    if (open_dialog.ShowDialog() == DialogResult.OK) //В диалоге нажата ОК
    {
        try
        {
            img = new Bitmap(open_dialog.FileName);
            MyPictureBox1.Image = img;
        }
        catch
        {
            DialogResult result = MessageBox.Show("Невозможно открыть выбранный файл",
            "Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
            MyPictureBox1.Image = null;
        }
    }
}
```

31

Рис. 4. Фрагмент кода – открытие файла

После выбора файла карта размещается в рабочей области, при этом она масштабируется, чтобы пользователь видел чертеж целиком. Для этого в свойство SizeMode контейнера PictureBox было установлено значение Zoom. Результат показан на рисунке 5.

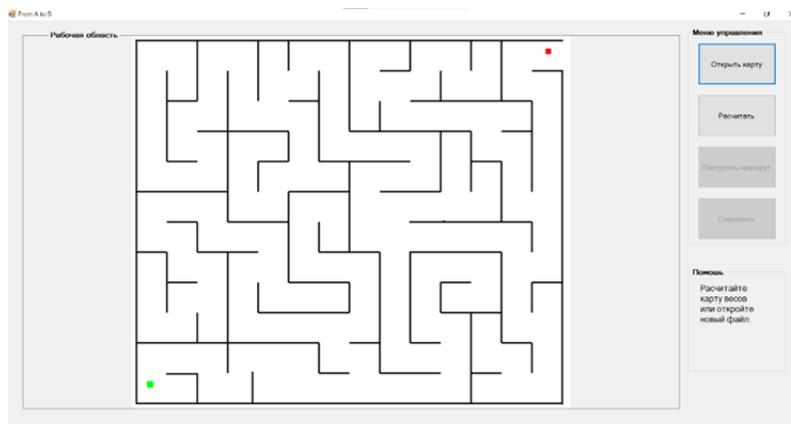


Рис. 5. Успешное открытие файла

Расчет карты весов

Следующим шагом после открытия чертежа является вычисление карты весов. Данное действие вынесено и закреплено за отдельной кнопкой. Сделано это для того, чтобы при ошибочном выборе файла не проводить вычисления – самый ресурсоемкий процесс программы.

Весами заполняются не все поля начального изображения, так как некоторые из них для этого не подходят (например, если они находятся



очень близко к границе препятствий). Поэтому сперва программа определяет положение и габариты перемещаемого объекта. В этом же цикле прохода по чертежу в коде определяется и конечное положение объекта.

После того как получены габариты объекта транспортировки, в программе появляются два значения, равные половине длины и ширины объекта. Так как маршрут будет рассчитываться для центра объекта, именно столько необходимо отступать от всех препятствий на карте.

При повторном чтении карты циклами в матрицу весов переносятся все ограничения, а также заносятся отступы, которые были описаны выше.

Получается следующее графическое представление данного процесса (рис. 6).

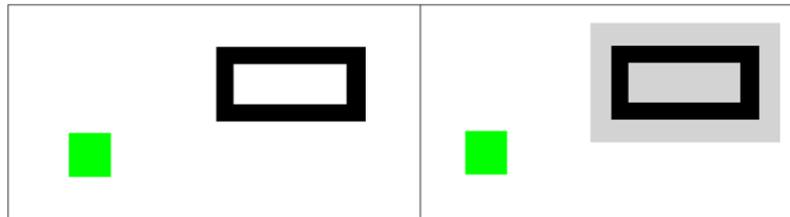


Рис. 6. Добавление отступов от препятствий

Для заполнения карты весов и определения оптимального маршрута в программе был выбран волновой алгоритм [6, с. 21–24] — метод поиска кратчайшего пути в планарном графе, основанный на поиске в ширину. Для данного метода характерен поиск путей двух видов: ортогонального (переходы в окрестность фон Неймана) и ортогонально-диагонального (переходы в окрестность Мура). Изображение окрестностей представлено на рисунке 7.

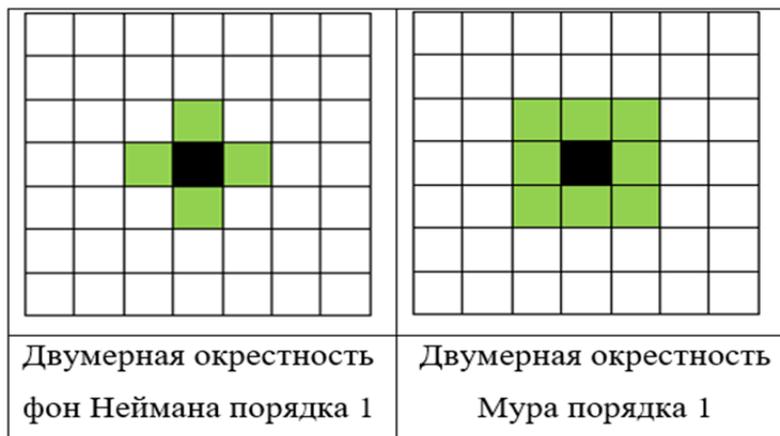


Рис. 7. Двумерные окрестности Мура и фон Неймана порядка 1



Используя окрестности Мура и придавая весу значение длины перехода, необходимо прибегнуть к матрице весов, состоящей из действительных чисел (тип `double`). Считая переходы по горизонтали и вертикали одинаковыми по весу и равными 1, получим, что вес перехода по диагонали равен $\sqrt{2}$. Оптимальность маршрутов, найденных в таком случае, будет увеличиваться, но также будут расти размер и вес таблицы и сложность ее заполнения. Помимо этого, такие маршруты менее предсказуемы для людей, которые будут находиться рядом с маршрутом следования транспортного средства, в результате чего могут возникать аварийные ситуации. Поэтому было принято решение использовать окрестность фон Неймана. Кроме того, при таких расчетах можно использовать матрицу весов, состоящую только из целых значений (тип `integer`), что уменьшит объем памяти, занимаемый матрицей, и упростит вычисления.

Для реализации волнового алгоритма в программе используется очередь `Queue` из системной коллекции `System.Collections.Generic`, в которую изначально помещается стартовая позиция. Далее, пока очередь не пуста или пока не достигнута конечная позиция, выполняется следующий алгоритм:

- 1) из очереди достается вершина;
- 2) считывается ее вес k ;
- 3) среди соседних вершин выбираются доступные для перехода и еще не заполненные вершины;
- 4) выбранным в пункте 3 вершинам присваивается вес $k + 1$;
- 5) вершины заносятся в конец очереди [6; 7].

Если на каком-то этапе был присвоен вес конечной вершине, то программа завершит расчет карты весов. Если очередь опустела, но конечной вершине так и не присвоен вес, отличный от 0, это значит, что начальная и конечная точки не могут быть соединены маршрутом при таких значениях габаритов транспорта или находятся в разных компонентах связности и пути между ними не существует. Пользователь в этом случае получит соответствующее сообщение.

Для выполнения пунктов 2–5 в программе реализована рекурсивная функция [7] `Krest(ref int[,] map, Point P)`. Код данной функции представлен ниже.

```
void krest(ref int[,] map, Point P)
{
    int N = map.GetLength(0); //длина карты
    int M = map.GetLength(1); //ширина карты
    int ves = map[P.x, P.y];
    if (P.x - 1 >= 0)
    { //проверка соседа слева
        if (map[P.x - 1, P.y] == 0)
        {
            map[P.x - 1, P.y] = ves + 1;
            //в очередь
            Point add = new Point();
            add.x = P.x - 1;
        }
    }
}
```



```
        add.y = P.y;
        Volna.Enqueue(add);
    }
}
if (P.x + 1 < N)
{// проверка соседа справа
    if (map[P.x + 1, P.y] == 0)
    {
        map[P.x + 1, P.y] = ves + 1;
        //в очередь
        Point add = new Point();
        add.x = P.x + 1;
        add.y = P.y;
        Volna.Enqueue(add);
    }
}
if (P.y - 1 >= 0)
{// проверка соседа снизу
    if (map[P.x, P.y - 1] == 0)
    {
        map[P.x, P.y - 1] = ves + 1;
        //в очередь
        Point add = new Point();
        add.x = P.x;
        add.y = P.y - 1;
        Volna.Enqueue(add);
    }
}
if (P.y + 1 < M)
{// проверка соседа сверху
    if (map[P.x, P.y + 1] == 0)
    {
        map[P.x, P.y + 1] = ves + 1;
        //в очередь
        Point add = new Point();
        add.x = P.x;
        add.y = P.y + 1;
        Volna.Enqueue(add);
    }
}
}
```

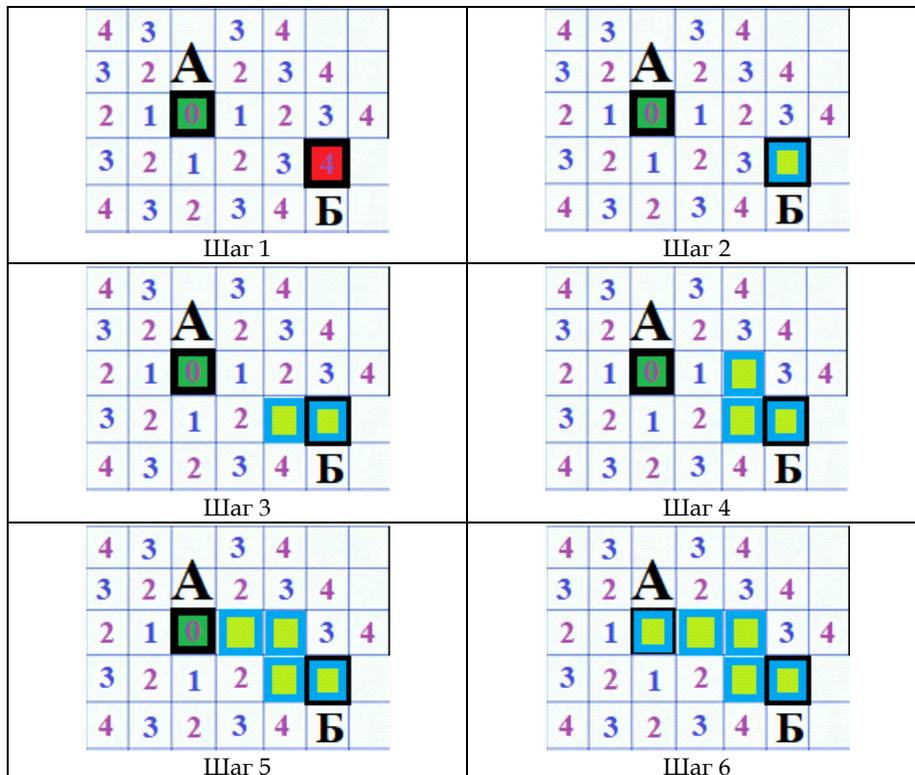
Построение маршрута

После просчета карты пользователю необходимо нажать на кнопку построения маршрута. В данном случае маршрут строится очень просто. У конечной точки ищется сосед с весом на единицу меньше, они связываются между собой и далее от полученной точки ищется сосед с весом, отличным на единицу от нее. Это повторяется, пока не будет достигнута начальная вершина, вес которой 0.

Покажем пример построения такого маршрута длины 5 в следующей таблице.



Пример построения маршрута



35

Таким образом могут быть построены несколько маршрутов. Все они будут оптимальны по расстоянию и будут отличаться лишь количеством поворотов. Путь, найденный в программе, отобразится в рабочей области, на изображении появится ломаная линия синего цвета. Ниже (рис. 8) приведен пример решения несложного лабиринта, показанного на рисунке 5. После расчета карты весов и построения маршрута окно программы выглядит следующим образом.

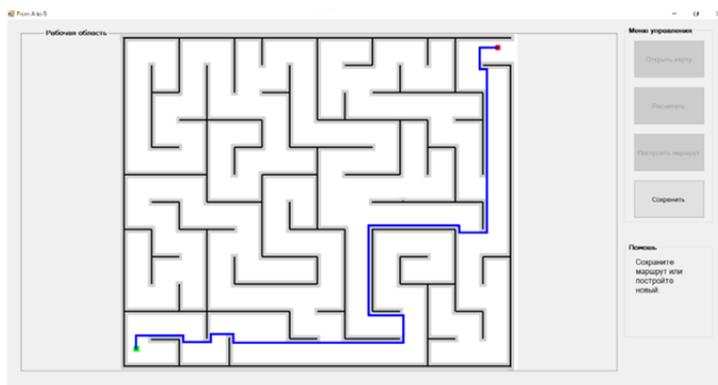


Рис. 8. Решение лабиринта



Сохранение результата

Полученный маршрут пользователь может сохранить во внешнем файле в одном из доступных форматов (bmp, png, jpg). Интерфейс сохранения реализован с помощью схожего с пунктом открытия диалогового окна `SaveFileDialog`. В нем предлагается ввести имя файла, выбрать его формат, а также расположение, как показано на рисунке 9. Фрагмент программного кода, которым обрабатывается нажатие на кнопку «Сохранить», представлен на рисунке 10.

36

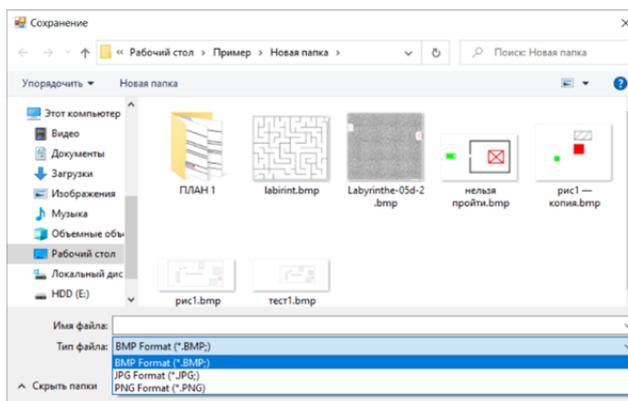


Рис. 9. Окно сохранения файла

```
private void SaveButton_Click(object sender, EventArgs e) //Сохранение в файл
{
    SaveFileDialog save_dialog = new SaveFileDialog();
    save_dialog.DefaultExt = ".jpg";
    save_dialog.Filter = "BMP Format (*.BMP)|*.BMP;|JPG Format (*.JPG)|*.JPG;|PNG Format (*.PNG)|*.PNG;";
    if(save_dialog.ShowDialog() == DialogResult.OK && save_dialog.FileName.Length > 0)
    {
        try
        {
            risunok.Save(save_dialog.FileName);
            label1text(5);
            OpenFileButton.Enabled = true;
            Calculate.Enabled = false;
            Road.Enabled = true;
            SaveButton.Enabled = true;
        }
        catch
        {
            DialogResult result = MessageBox.Show("Невозможно сохранить файл",
            "Ошибка", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
        }
    }
}
```

Рис. 10. Фрагмент кода — нажатие кнопки «Сохранить»

После сохранения файла его можно будет открыть как в любом графическом редакторе или программе для просмотра изображений, так и в специализированных программах, например AutoCAD. Наложив полученное изображение на существующий чертеж с некоторым значением прозрачности, пользователь сможет перенести маршрут на схему, выполненную в формате `dwg`, указать на ней ключевые точки, рассчитать расстояния, координаты и многое другое.



Тестирование программы

Написанная программа была протестирована на чертежах компании «Автотор». Получены результаты как для новых цехов, находящихся на стадии планирования, так и для уже существующих решений. Представители компании остались довольны результатом, во время обсуждения были предложены варианты развития и усовершенствования данного программного обеспечения.

Выводы

В результате работы была написана компьютерная программа с несложным для понимания пользователем графическим интерфейсом, позволяющая по входному изображению карты с препятствиями строить оптимальные маршруты доставки в конечный пункт с учетом габаритов перемещаемого объекта. Полученное приложение представляет собой отдельный самостоятельный продукт. Кроме того, есть возможность несложным образом перестроить его для работы в виде подпрограммы для более сложной системы.

37

Список литературы

1. Zhang Q., Ding X., Zhou J. Research on aircraft route planning optimization problem with multi-constraints and dual-targets // J. Math. Industry. 2020. Vol. 10, iss. 26.
2. *Автотор* : [официальный сайт]. URL: <http://www.avtotor.ru/kompaniya/o-kompanii> (дата обращения: 01.06.2021).
3. Jan G.E., Chang K. Yin, Parberry I. Optimal Path Planning for Mobile Robot Navigation // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2008. Vol. 13, iss. 4.
4. Microsoft Visual Studio : [официальный сайт]. URL: <https://visualstudio.microsoft.com/ru/> (дата обращения: 01.06.2021).
5. *Элементы управления для использования в формах Windows Forms*. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/desktop/winforms/controls/controls-to-use-on-windows-forms?view=netframeworkdesktop-4.8> (дата обращения: 01.06.2021).
6. *Конструкторское проектирование : методические указания к лабораторному практикуму и курсовому проектированию* / сост. В.В. Муханов, А.В. Серегин. Екатеринбург, 2006. URL: <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/421/1/KnstPrA4.pdf> (дата обращения: 01.05.2021).
7. *Лекция 4: Рекурсивные функции* // НОУ ИНТУИТ. URL: <https://intuit.ru/studies/courses/648/504/lecture/11423> (дата обращения: 01.06.2021).

Об авторах

Максим Владимирович Головенко — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: golovenko.mv@yandex.ru

Олег Владимирович Толстель — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: tolstel.oleg@mail.ru



Дмитрий Викторович Михеенко — начальник отдела промышленной электроники ООО «Автотор Холдинг», Россия.

E-mail: miheenkodv@kld.avtotor.ru

The authors

Maxim V. Golovenko, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: golovenko.mv@yandex.ru

Dr Oleg V. Tolstel, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: tolstel.oleg@mail.ru

Dmitriy V. Mikheenko, Head of the Industrial Electronics Department of Avtotor Holding, Russia.

E-mail: miheenkodv@kld.avtotor.ru

А. А. Персичкин, Д. А. Хватов, А. А. Шпилевой

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ

Поступила в редакцию 16.05.2021 г.

Рецензия от 03.06.2021 г.

Проанализированы возможности оценки угроз безопасности информации, основанные на методике ФСТЭК России в части обработки результатов работы экспертной группы. Предложен способ перевода лингвистических переменных в числовые значения на основе функции желательности Харрингтона. Использование математического базиса позволяет оптимизировать процесс обработки результатов экспертной группы, повысить точность и результативность принятия окончательных выводов.

The paper analyzes the possibilities of assessing information security threats based on the methodology of the FSTEC of Russia in terms of processing the results of the work of the expert group. A method for translating linguistic variables into numerical values based on the Harrington desirability function is proposed. The use of the mathematical basis makes it possible to optimize the process of processing the results of the expert group, to increase the accuracy and effectiveness of making final conclusions.

Ключевые слова: методика ФСТЭК, экспертная группа, оценка угроз, информационная безопасность, лингвистические переменные

Keywords: FSTEC's methodology, expert group, threat assessment, information security, linguistic variables

Как известно, с февраля 2021 г. вступила в силу методика оценки угроз безопасности информации, разработанная ФСТЭК России [1]. Методика применяется для определения угроз безопасности информации [2; 3] в государственных и муниципальных информационных системах, информационных системах персональных данных, значимых объектах критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и т. д.

Для оценки угрозы в методике предложен экспертный метод, с этой целью разработаны рекомендации по формированию экспертной группы (приложение 2 к методике), а также по определению итоговой оценки [1].

В настоящей работе рассматривается подход к обработке результатов работы экспертной группы по оценке угроз информационной безопасности, основанный на психометрических функциях. В его рамках предлагается использовать аппарат лингвистических переменных, который, в отличие от аппарата числовых переменных, позволяет экспертно оценить достаточно сложные явления и при этом минимизировать разброс результатов такой оценки [4; 5].



При конструировании градаций шкал значений лингвистической переменной следует учитывать тот факт, что человек плохо воспринимает излишне детализированные шкалы. Анализ психофизических данных свидетельствует о том, что человек уверенно различает семь градаций на шкале некоторого признака, чему мы находим множество подтверждений: семь основных цветов, семь нот и т.д. Если же шкала содержит большее число градаций, то соседние уровни начинают сливаться и уже не могут быть с уверенностью разграничены, в связи с чем на практике преимущественно используются только пять градаций для оценки события (явления), которых, как правило, вполне достаточно [6].

С учетом данного обстоятельства в настоящей методике устанавливается и в дальнейшем используется шкала лингвистических переменных для экспертной оценки угрозы информационной безопасности, ограниченная следующими значениями: очень высокая; высокая; средняя; низкая; очень низкая.

Для формирования объективных выводов, подлежащих документальному оформлению, требуется конкретная количественная оценка значений, полученных с использованием аппарата «лингвистических переменных». Одним из наиболее удобных и часто применяемых на практике способов установления соответствия между лингвистическими и количественными переменными является использование обобщенной функции желательности Харрингтона [6]. Функция возникла в результате множества наблюдений за реальными оценками экспертов в разных областях человеческой деятельности и описывается следующим математическим выражением:

$$d = \exp[-\exp(-x)]. \tag{1}$$

Исходя из формулы (1) процедуру перевода лингвистических переменных в числовые параметры можно пояснить графиком зависимости, представленным ниже.

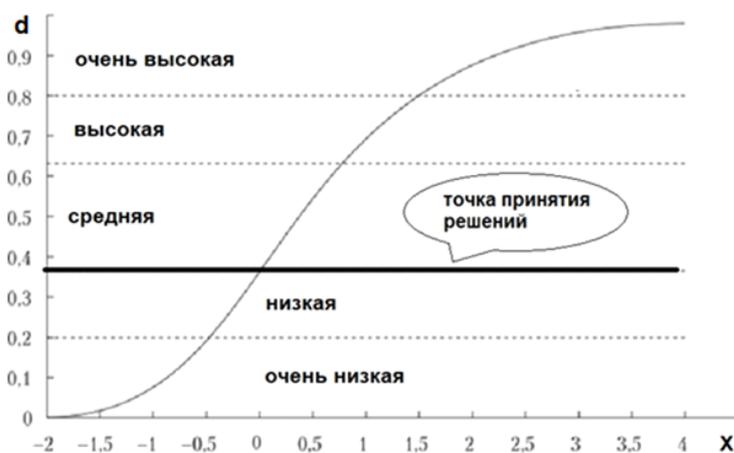


Рис. Обобщенная функция желательности Харрингтона



Выбор значений на шкале желательности не является случайным [6]: например, значение $d=0,37$ соответствует точке перегиба графика (1), что для лингвистической переменной совпадает с моментом перехода из удовлетворительного состояния в неудовлетворительное. Другое название указанной точки — «точка принятия решений».

Пример реализации перевода лингвистических переменных в числовые значения на основе функции желательности Харрингтона приводится в таблице 1.

Таблица 1

Перевод лингвистических переменных в числовые значения

Возможность реализации угрозы	Диапазон значений возможности реализации угрозы на шкале желательности	Весовой коэффициент возможности реализации угрозы
Очень высокая	0,80 – 1,00	0,94
Высокая	0,63 – 0,80	0,72
Средняя	0,37 – 0,63	0,51
Низкая	0,2 – 0,37	0,29
Очень низкая	0 – 0,2	0,02

Весовые коэффициенты возможности реализации угрозы, представленные в таблице 1, являются средними значениями функции желательности в диапазонах значений возможности реализации угрозы.

Суть процесса обработки результатов по указанной методике состоит в следующей последовательности действий:

- эксперты оценивают угрозу с помощью пяти лингвистических переменных (угроза очень высокая, высокая, средняя, низкая, очень низкая);
- каждая лингвистическая переменная сопоставляется с ее весовым коэффициентом;
- вычисляется общий итог оценки как среднее значение весовых коэффициентов;
- выносится заключение относительно актуальности угрозы (угроза считается актуальной, если итоговое значение оценки больше значения «точки принятия решений», то есть больше 0,37).

Пример результатов обработки оценок экспертной группы представлен в таблице 2.

Таблица 2

Результаты обработки оценок экспертной группы

Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Эксперт 4	Эксперт 5
Ущерб физическому лицу				
Финансовый, иной материальный ущерб физическому лицу				
Очень высокая	Средняя	Очень высокая	Высокая	Низкая
0,94	0,51	0,94	0,72	0,29

Общий итог оценки (среднее значение) – 0,68.

Вывод: угроза актуальна.



Предложенная методика позволяет оптимизировать процесс обработки результатов работы экспертной группы по оценке угроз информационной безопасности, так как от экспертов в данном случае требуется только лингвистическая оценка возможности реализации угрозы. Точность и корректность окончательных выводов также можно считать оптимальными, поскольку они основываются на конкретном математическом базисе.

Список литературы

1. Методика оценки угроз безопасности информации : метод. документ (утв. ФСТЭК России 5 февраля 2021). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».
2. Вострецова Е.В. Основы информационной безопасности : учеб. пособие. Екатеринбург, 2019.
3. Плетнев П.В., Белов В.М. Методика оценки рисков информационной безопасности // Математическое обоснование и теоретические аспекты информационной безопасности. Доклады ТУСУР. 2018. №1 (25), ч. 2. С. 83–86.
4. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / пер. с англ. М., 1976.
5. Диллигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. М., 2004.
6. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., 1976.

Об авторах

Андрей Андреевич Персичкин – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Россия.

E-mail: a.persichkin@kgnic.ru

Дмитрий Александрович Хватов – начальник отдела дополнительного образования, Калининградский государственный научно-исследовательский центр информационной и технической безопасности, Россия.

E-mail: hvatov-dmitrii@mail.ru

Андрей Алексеевич Шпилевой – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Россия.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

The authors

Andrey A. Persichkin, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: a.persichkin@kgnic.ru

Dmitry A. Khvatov, Head of the Department of Continuing Education, Kaliningrad State Research Center for Information and Technical Security, Russia.

E-mail: hvatov-dmitrii@mail.ru

Dr Andrey A. Shpilevoy, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

УДК 004.8

**А. В. Колесников, С. Б. Румовская, Э. В. Ясинский
А. В. Барзенков**

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ
ОПЕРАТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКОЙ
МЕТОДАМИ КОГНИТИВНЫХ ГИБРИДНЫХ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ
Часть 3**

43

Поступила в редакцию 05.11.2020 г.

Рецензия от 25.11.2020 г.

Вещное мышление традиционно для современного человека, которому свойственно описывать мир как множество пространственно локализованных объектов-вещей-ресурсов. Язык оперативно-технологического управления разработан на основе заложенной А.В. Колесниковым и В.Ф. Пономаревым традиции вещного семиотического полиязыкового представления оперативно-технологического управления как некоторого класса сложных систем, базисом которых является вербально-знаковый, реляционный язык описания ситуаций и состояния объекта управления. Язык специфицирован с использованием теории концептосферы З.Д. Поповой и И.А. Стернина, а также универсального предметного кода Н.И. Жинкина. Описано категориальное ядро и предметно-изобразительное кодирование двуединого категориального базиса языка отношений и связей объекта оперативно-технологического управления, а также концептуальная схема языка, представлены результаты разработки ее отображения в схему «Система оперативно-технологического управления», в субъекте управления которой есть когнитивная гибридная интеллектуальная система.

Substantial thinking is traditional for a modern person, who is characterized by a description of the world as a set of spatially localized objects-things-resources. The language of operational-technological control was developed on the basis of the tradition of A. V. Kolesnikova – V. F. Ponomarev's semiotic, multilingual representation of operational and technological control of a certain class of complex systems, the basis of which is a verbal-sign, relational language for describing situations and the state of a controlled object. The language was specified using the conceptual theory of Z. D. Popova and I. A. Sternin, as well as the universal subject code of N. I. Zhinkin. The work describes the categorical core and subject-pictorial coding of the two-unit categorical basis of the language of relations and connections of the object of op-



erational and technological control, and also describes the conceptual scheme of the language and presents the results of the development of its mapping into the scheme "System of operational and technological control". The last has cognitive hybrid intelligent system as an actor.

Ключевые слова: интеллектуальная электроэнергетическая система, мир оперативно-технологической действительности, язык отношений и связей, категориальный базис, когнитивный искусственный интеллект

Keywords: intelligent power system, world of operational and technological reality, language of relations and connections, categorical basis, cognitive artificial intelligence

Введение

Настоящая работа — третья часть публикации с единым названием, логически увязанная с содержанием первой и второй частей [1; 2], где были рассмотрены: 1) результаты анализа особенностей и структуры системы оперативно-технологического управления региональными электроэнергетическими системами на примере Калининградской области; 2) результаты исследования объекта оперативно-технологического управления с онтологической и математической точек зрения; 3) результаты анализа субъекта (человеческого фактора) оперативно-технологического управления (ОТУ) в региональной интеллектуальной электроэнергетике (ИЭЭ), его внешней среды, особенностей восприятия им информации и его мыслительных механизмов, а также языка профессиональной деятельности субъекта управления. Настоящая работа содержит описание категориального базиса модели мира оперативно-технологической действительности (ОТД), а также структуру языка отношений и связей (ЯОС) оперативно-технологического управления региональной ИЭЭ.

Категориальный базис модели мира оперативно-технологической действительности региональной интеллектуальной электроэнергетики

А.И. Уёмов [3] разработал параметрическую общую теорию систем и новое логическое исчисление, основанное на двух тройках категорий формального аппарата языка тернарного описания систем: «вещь, свойство, отношение» и «определенное, неопределенное, произвольное». Главная особенность триады «вещь, свойство, отношение» состоит в том, что все эти категории определяются друг через друга, причем центральная, основная из них — категория вещи.

Определение 1. Вещь — это система качеств; различные вещи — различные системы качеств; одна и та же вещь — одна и та же система качеств; все вещи существуют в пространстве и времени.

Уже в начале XX в. физика располагала несомненными доказательствами того, что электромагнитное поле обладает массой и энергией — свойствами материи. Масса характеризует инертные и гравитационные



свойства, а энергия — мера движения материи [4], определить наличие которой можно только разумом. Для правильного анализа состояния наблюдаемого мира ОТД недостаточно знать только фундаментальные законы электричества, механики и др., важно учитывать и существование самого наблюдателя [5].

Определение 2. Свойство — понятие или форма (изображение), обозначающее все то, что не является границами данной вещи. Это то, что, характеризуя вещи, не образует новых вещей. Качество и свойство иногда очень трудно различать. Вещи и свойства можно воспринимать чувственно.

Определение 3. Отношение — то, что образует вещь из данных элементов (свойств или других вещей). Отношение есть то, что, будучи установлено между вещами, образует новые вещи. Отношения чувственно не воспринимаются.

Между категориями вещи, свойства и отношения существует зависимость, представленная на рисунке 1, а, из которого видно, что все три категории Уёмова — соотносительные и определяются друг через друга, причем центральная из них — категория вещи.

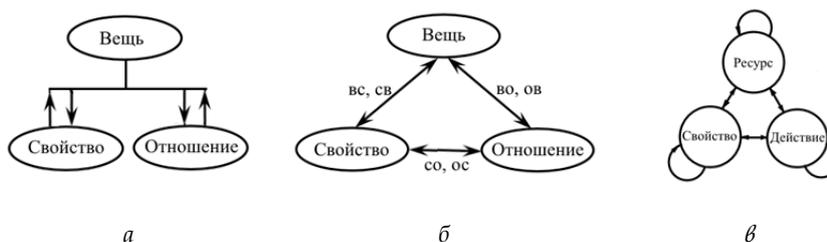


Рис. 1. Адаптация триады А.И. Уёмова для анализа языка профессиональной деятельности:
 а — триада категорий «вещь, свойство, отношение» А.И. Уёмова;
 б — образное представление треугольника А.И. Уёмова в форме графа;
 в — ролевая модель категориального ядра «ресурс, свойство, действие»

Тройственность категорий вещи, свойства и отношения выражает треугольник А.И. Уёмова (рис. 1, б). Через категорию вещи непосредственно определяются категории свойства (дуга *св*) и отношения (дуга *ов*). Категория свойства непосредственно определяется категорией отношения (дуга *со*) и опосредованно — через категорию вещи (маршрут *св, вс* длины два). Что же касается практического определения отношения через вещи (дуга *ов*) и вещей через отношения (дуга *во*), то необходимо отметить, что как вещи можно определять через одни свойства, а эти свойства — через другие вещи (маршрут *вс, св* длины два), так и вещи определяются одними отношениями, а эти отношения можно определять через другие вещи (маршрут *во, ов* длины два). Чтобы это было возможно, необходимо и достаточно существования одних и тех же отношений в различных вещах. Разумеется, элементы, между кото-



рыми есть эти отношения, в различных вещах должны определять через другие отношения, так как иначе при одинаковых отношениях имела бы одна и та же вещь. Положение о том, что одно и то же отношение, так же как и одно и то же свойство, может быть в различных вещах, — важнейшее условие возможности выводов по аналогии. Чтобы избежать круга в определении отдельных отношений, вещи, через которые определяются эти отношения, нужно, в свою очередь, определять через другие отношения. Это предполагает, что одну и ту же вещь можно одновременно рассматривать как различные соотношения ее элементов.

Тем не менее на рисунке 1, а остается без ответа интерпретация дуг графа. Судя по авторскому тексту А. И. Уёмова [3], их следует понимать как «непосредственное определение». В языках профессиональной деятельности (ЯПД) «непосредственное определение» обозначается глаголами *иметь* и *быть* либо словосочетаниями *иметь имя, иметь характеристику, иметь длину, иметь грузоподъемность* либо *быть средством, быть местом, быть подстанцией*, что относит подобные лексемы в класс «отношений определения» [6]. Тогда, если следовать А. И. Уёмову, на рисунке 1, б возникает противоречие: вершина «отношение» и дуги обозначают одну и ту же категорию.

Непосредственное применение рассмотренного категориального ядра к системогенезу предметной области ОТУ региональной энергосистемы (ЭС) затруднительно в силу нескольких причин: 1) категория вещи — верхний предел абстракции, что вызывает трудности с ее интерпретацией субъектом ОТУ; 2) имеются трудности с интерпретацией понятия «зависимость» между категориями ядра: поскольку зависимость между ними — это отношение (взаимоотношение), возникают два толкования концепта «отношение»; 3) категория «отношение» носит общий характер, и целесообразно выбрать категорию, которая, являясь отношением, была бы в то же время предметно-ориентированной. Трудности преодолены в работе [6]. Рассматриваются только вещи-ресурсы (просто ресурсы). К ним отнесем энергию электромагнитного поля и природные явления, вне зависимости от эффекта их воздействия. Следуя принципу «единства сознания и деятельности» и теории деятельности психологической школы А. Н. Леонтьева и С. Л. Рубинштейна, из множества отношений выделим отношения-действия (просто «действия», «операции», «процессы», в частности технологические и производственные), подчеркивая тем самым интерес к динамическим отношениям, по Д. А. Поспелову, на ресурсах, установление (или разрыв) которых может изменить состояние и режим объекта ОТУ.

Определение 4. Ресурс — понятие или форма (изображение), обозначающее вещь, имеющуюся у субъекта ОТУ для решения задач. Например, распределительная подстанция, воздушная ЛЭП и др.

Определение 5. Действие — понятие или форма (изображение), обозначающее отношения на ресурсах как следствие деятельности, поступков и поведения (например, преобразование, хранение, передача электроэнергии и др.). Остановимся на категории «действие» подробнее.



Де́йствие (англ. action, performance) — единица деятельности, целенаправленная преднамеренная активность, осуществляемая субъектом деятельности произвольно. Всякое действие включает в себя операции. Действия могут переходить в операции, и наоборот. Действие структурно включает ориентировочную, исполнительную, контрольную и корректировочную части. Ориентировочная часть — принятие решения, исполнительная — реализация действия, контрольная — сравнение результата с ожиданиями (обратная связь), корректировочная — изменение решения и реализации действия. Смысл действия может быть скрыт от осознания [7].

Действие (в психологии) — произвольный акт, акция, процесс, подчиненный представлению о результате, образу будущего, то есть процесс, ориентированный на осознаваемую (сознательную) цель [8]. Приобретая личностную окраску, действие становится поступком.

Действие, по С.И. Ожегову: 1. Проявление энергии, деятельности, а также сама сила, деятельность, функционирование чего-нибудь. 2. Результат проявления деятельности чего-нибудь, влияние, воздействие. 3. Поступки, поведение, самовольные действия, противозаконные действия. 4. События, о которых идет речь в истории. 5. Часть драматического произведения (спектакля, комедии). 6. Основной вид математического вычисления [9].

Операция (англ. operation) — составляющая деятельности человека, соотносимая с задачей (объективно-предметными условиями достижения целей), способ осуществления действия (по А.Н. Леонтьеву). Сознательная операция первоначально формируется в качестве сознательного целенаправленного действия (справедливо для двигательных и умственных операций), но не всякая операция является сознательной.

В русском языке действия обозначаются различными частями речи: глаголами (например, включать, выключать, переключать, предавать, сообщать), существительными (распределение, преобразование, передача), вводными словами, выражающими модальность (например, словами, выражающими различную степень уверенности: *разумеется, безусловно, действительно* и др.; различную степень неуверенности: *возможно, по-видимому, кажется, пожалуй* и др.; эмоциональное отношение к высказываемому: *к счастью, к огорчению, к неудовольствию, на беду*), союзами (например, выражающими значение временной соотнесенности действий: *когда, как, пока, едва*; причинности: *так как, вследствие*; условий: *если, когда*), наречиями (например, определительными наречиями, характеризующими само действие, признак — его качество, количество, способ совершения: *очень, красиво, весело, по-моему, пешком, так, вдвоем, несколько, втрое*; обстоятельственными наречиями места (*справа, там, наверху*), времени (*вчера, тогда, весной, когда*), причины (*сгоряча, почему, потому*)), цели (*назло, зачем, затем*)), междометиями (*эй, стоп, алло*), а также знаками препинания [10; 11].

Предметно-изобразительные представления действий широко используются на фотографиях, знаках дорожного движения, 3D-видеомоделях, мнемосхемах, схемах, пиктограммах в ЭС (рис. 2).

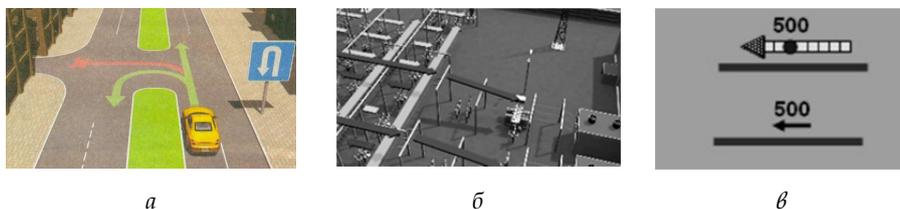


Рис. 2. Предметно-изобразительные представления действий:
a – обозначение направления движения автотранспорта; *б* – обозначение движения энергии электромагнитного поля по шинам подстанции [12]; *в* – обозначение перетока активной мощности по ЛЭП в ситуационной технологии отображения информации «Поднял глаза – и все понял» Л.С. Штейнбока [13]

48

Выполненные преобразования с треугольником А.И. Уёмова, изображенные на рисунке 1, *в* (с. 45) дают простую и прозрачную категоризацию мира ОТД – мира ресурсов, действий, их свойств и девяти классов отношений ЯОС: «ресурс – ресурс», «действие – действие», «свойство – свойство», «ресурс – свойство» и «свойство – ресурс», «ресурс – действие» и «действие – ресурс», а также «действие – свойство» и «свойство – действие».

Первая особенность модели на рисунке 1, *в* – ее ролевой характер – по сути, сформулирована в перечне девяти классов отношений. Например, «ресурс – ресурс» – неявно выраженное отношение с двумя ролями, причем обе роли играют ресурсы. Ролевой характер придает модели универсальность и делает ее независимой от специфики предметной области ОТУ ЭС. Вторая особенность – ролевой характер модели – может отображаться как в предикативно-вербальном, так и предметно-изобразительном виде.

Символизм базовых форм предметно-изобразительного базиса. На основе исследования [14] и с учетом семантики онтологии моделей мира Т.П. Григорьевой [15] выбраны шесть базовых форм предметно-изобразительного базиса ЯОС предметной области ОТУ региональной ИЭЭ (рис. 3).



Рис. 3. Базовые формы предметно-изобразительного базиса ЯОС ОТУ региональной интеллектуальной электроэнергетики:
 квадрат – символ ресурса; треугольник – символ свойства; стрелка – символ действия;
 круг – символ идеального, сознания, духовного мира; точка – символ квинтэссенции всех знаков; прямая линия – символ разума, составляющая всех геометрических фигур

Квадрат – символ греческой, дуальной модели мира («белое или черное») и линейного мышления: порядок, равенство, постоянство, земля, устойчивость, совершенный тип замкнутого пространства, знак материального мира. Треугольник – символ поверхности, полной физической и телесной гармонии и равновесия. Круг – символ восточной модели мира («белое станет черным» и «белое и есть черное»): целостность, непрерывность и первоначальное совершенство, время, дина-



мизм, бесконечное движение, завершение и исполнение, знак духовного мира. Стрела — символ взлета, силы, действия, целенаправленности, энергии, преодоления пространства, импульса; знак направления, полета, скорости и достижения цели. Точка — символ точечного восприятия мира, она начинает любое явление, лежит в основе всех измерений, порождает в своем развитии линию и движение, выражает самопроявление единичного как Единого, полюс (центр, начало отсчета) единства. Прямая линия — символ разума у пифагорейцев, составляющая всех геометрических фигур, синоним стрелы. Отрезок прямой линии на схемах, рисунках символизирует связь, взаимоотношение, отношение чего-либо (кого-либо) к чему-либо другому (кому-либо другому) как в физическом (реальном) мире, так и в мыслительном и духовном мирах.

Семантика двуединого категориального базиса (ДКБ) языка описания отношений и связей предметной области. Семантика ДКБ выражена посредством отображения соотношения языка и мышления в лингвокультурологических терминах «концепт» и «концептосфера» З.Д. Поповой и И.А. Стернина [16] и в терминах языкознания, психолингвистики, когнитивной лингвистики — «универсальный предметный код (УПК)», «двухзвенный механизм мышления» Н.И. Жинкина [17]. Несмотря на подтверждение когнитивными исследованиями того, что традиционный подход к мышлению как к процессу оперирования четкими логическими понятиями не отражает сущности ментальной деятельности человека-оператора, термины «концепт» и «концептосфера» за редким исключением [18] все еще не вошли в обиход специалистов по искусственному интеллекту (ИИ). Поясним их содержание применительно к обсуждаемой теме.

Концепт в современных науках — сгусток культуры в сознании человека-оператора, то, в виде чего культура входит в его ментальный мир, единица с нечеткими границами, принадлежащая сознанию, детерминируемая культурой и опредмечиваемая в ЯПД и ЯОС. Концепт — это «квант знания» о феномене реального и/или воображаемого мира, единица оперативного мышления человека-оператора, относительно систематизированный набор когнитивных признаков системы ОТУ (мыслительные картинки, рамочные понятия и понятия с плотным ядром, фреймы, сценарии и т.д.). Концепт включает три составляющие: понятийную, образную, ценностную (прагматическую) [19] — и интегрирует информацию, поступающую к оператору извне по разным каналам перцепции, обобщает абстрактные и конкретно-чувственные образы, тем самым отличаясь от других ментальных единиц — понятия и языкового значения.

Концептосфера, по З.Д. Поповой и И.А. Стернину [16], — область мыслительных образов, единиц универсального предметного кода, представляющих собой структурированное знание операторов-диспетчеров, их информационную базу, а семантическое пространство ЯПД — часть концептосферы, получившая выражение (вербализацию, объективацию) в системе языковых знаков (слов, фразеосочетаний, синтаксических структур) и образуемая значениями языковых единиц.

Универсальный предметный код (УПК), по Н.И. Жинкину [17], — несловесный предметно-образный код, наглядные образы, формирующиеся в сознании оператора в процессе восприятия им мира ОТД. Ин-



теллект оператора, для которого предназначается сообщение, не понимает естественного языка. У него есть собственный информационный язык, на котором он строит гипотезы, доказательства, делает выводы, выносит решения и т.д. Единицы УПК – нейрофизиологические единицы, кодирующие и хранящие в биоэлектрической форме знания оператора. Это образы, схемы, картины, чувственные представления, эмоциональные состояния, которые кодируют элементы знаний, объединяя и дифференцируя их в памяти по различным основаниям. Объединяясь в более крупные комплексы, они создают комплексные картины, активизация отдельных элементов которых, выделение в структуре комплексной картины ситуации некого признака представляет собой предикацию. В когнитивной лингвистике есть термины, подобные УПК: образный код, смешанный код, предметно-схемный код, внутренний субъективный код, предметно-изобразительный код, вторичный код, язык мозга, автономный код, индивидуальный код и др. В этой связи терминология, методы, модели и средства онтологической инженерии требуют ревизии как с теоретической, так и с практической позиции.

Понятия концепта (концептосферы) и УПК – фундамент представлений категориального базиса ЯОС мира ОТД в интеллектуальной энергетике (рис. 4).

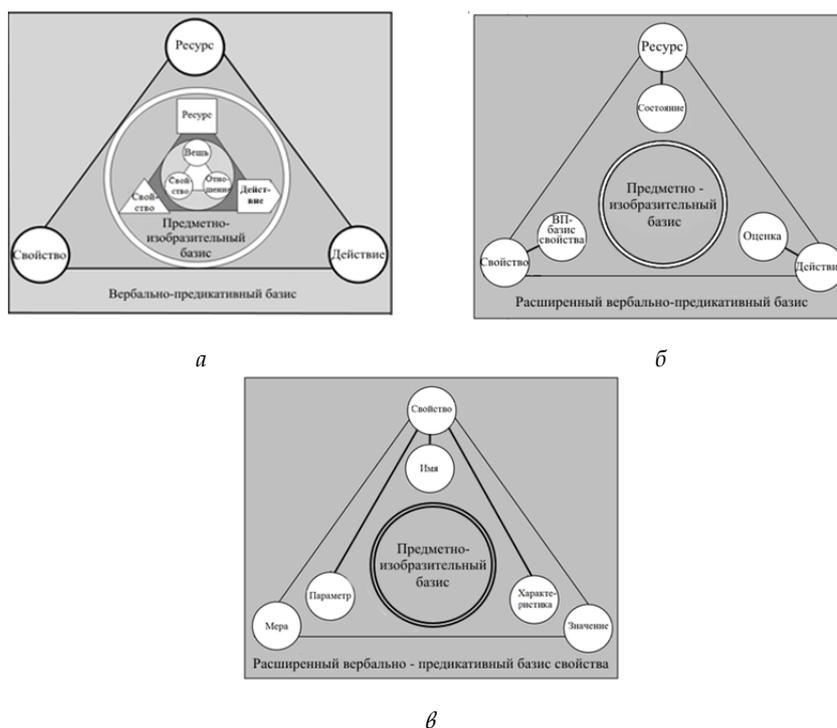


Рис. 4. Категориальный базис языка описания отношений и связей мира ОТД в интеллектуальной электроэнергетике:
а – вербально-предикативный и предметно-изобразительный базисы;
б – расширенный вербально-предикативный базис;
в – расширенный вербально-предикативный базис категории «свойство»



Двуединство предметно-изобразительного (ПИБ) и вербально-предикативного (ВПБ) базиса изображено на рисунке 4, а. Первый представлен серым кругом, в котором показаны два треугольника: внешний, в вершинах которого расположены базовые формы ресурса (квадрат), свойства (треугольник) и действия (стрелка), и внутренний, центральный, «порождающий» треугольник А.И. Уёмова, заключенный в окружность. Если мысленно провести линии со стрелками от его центра к вершинам внешнего треугольника, то на них расположатся (в направлении от центра) последовательности элементов категориального базиса «вещь — форма ресурса — понятие ресурса», «свойство — форма свойства — понятие свойства» и «отношение — форма действия — понятие действия», что слева направо обозначает три уровня психического отражения объективной реальности оператором:

1. Сенсорно-перцептивный уровень, навязываемый интеллекту оператора извне, когда он воспринимает ресурс в том месте, в котором тот находится в данный момент, когда действует на органы чувств.

2. Уровень представлений, вторичных образов ресурсов: образная память как фиксация и воспроизведение образов, возникших при восприятии и воображении, как творческий процесс, создание новых образов трансформацией и комбинированием сохраненных в памяти. При переходе от ощущения и восприятия к представлению изменяется структура образа ресурсов: одни признаки усиливаются, другие редуцируются, предметный образ схематизируется. Этот уровень имеет решающее значение при формировании образов-эталонов — «когнитивных карт», концептуальных моделей, наглядных схем, планов и других «когнитивных образований», необходимых для выполнения оперативной деятельности. Это уровень иконических и индексальных знаков по Ч.С. Пирсу. Данный уровень ПИБ гипотетически соответствует УПК Н.И. Жинкина.

3. Вербально-предикативные, понятийные абстракции и обобщения, зафиксированные в знаках и знаковых системах логического мышления, речемыслительного процесса и рационального познания: математические, графические и другие знаки, а также правила их применения (символические знаки по Ч.С. Пирсу).

Условное движение по стрелкам-векторам от центра соответствует таким когнитивным операциям оперативного мышления, как абстрагирование, обобщение, именованное, категоризация и высказывание. Условное движение к центру — дифференциация, редукция, конкретизация, понимание. В реальном когнитивном процессе оператора-диспетчера ОТУ оба «движения» органически взаимосвязаны, непрерывно переходят одно в другое.

ПИБ «ограничен квадратной оболочкой» ВПБ — словаря лексем, над которым строятся знаковые, предикативные высказывания ЯОС ОТУ.

В квадрат, метафору лексики ЯОС, вписана фигура — ролевая модель категориального ядра «ресурс, свойство, действие» (рис. 4, а). Это треугольная форма с вершинами, обозначенными как «ресурс, свойство, действие», описанная вокруг окружности — метафоры предметно-изобразительного базиса (петли при вершинах опущены). Треугольник «ресурс, свойство, действие» наследует ВПБ от треугольника



А. И. Уёмова (рис. 1, б). На рисунке 4, б, в показано расширение ролевой модели категориального ядра: единицами измерения (мерами), значениями, состояниями, оценками, параметрами (физическими свойствами), характеристиками (характеристическими свойствами) и именами (именными свойствами).

Двуединство ПИБ и ВПБ отражено в содержании понятия «концептосфера» З. Д. Поповой и И. А. Стернина. Из этого следует, что ПИБ-базис получает следующие свойства УПК: 1) непроизносимость, отсутствие материальных признаков слов ЯПД; нет последовательности знаков, а есть изображения, образующие цепь или группировку; 2) обозначаемое здесь одновременно и знак; 3) предметность: когда человек-оператор говорит: «Подстанция Северная», то за буквами или звуками языка он понимает сам ресурс – подстанцию Северная на окраине Калининграда; когда же человек-оператор представляет себе подстанцию Северная, то независимо от каких-либо букв или звуков он имеет в виду сам ресурс как предмет, могущий породить множество электроподстанций Калининградской области; 4) представления как изобразительные компоненты схематичны; 5) схемы ресурсов – единое целое, каждый элемент которого непроизносим, но по нему можно восстановить произносимые слова ЯПД; 6) универсальность языка ПИБ, с которого возможны переводы на все другие языки; 7) язык ПИБ свободен от избыточности, свойственной всем; 8) в языке ПИБ связи, отношения предметны, то есть содержательны, а не формальны, и конвенциональное правило составляется *ad hoc* на время мыслительной операции. Как только мысль переработана в форму ЯПД ОТД, кодовый, мыслительный прием может быть забыт.

Структурирование знаний операторов интеллектуальной электроэнергетики как концептосферы, построенной на ПИБ и ВПБ, согласуется со следующими свойствами УПК:

1. Без изобразительного языка ПИБ-базиса невозможен никакой ЯПД ВПБ, но и без ЯПД внутренняя, изобразительная речь бессмысленна.

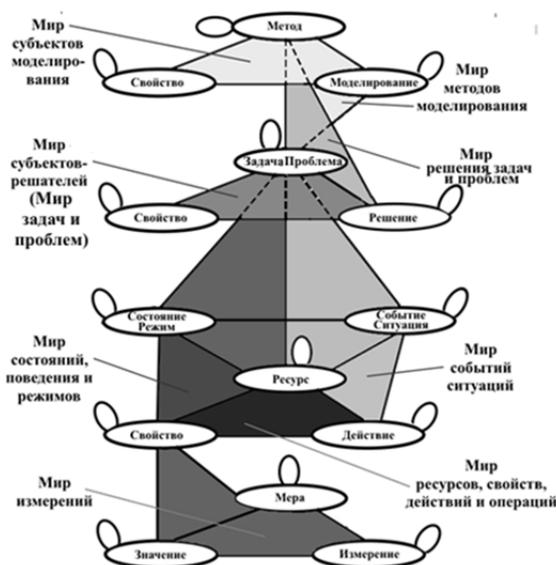
2. Применение ЯПД в коммуникации возможно только через фазу внутренней речи ПИБ. Решение мыслительной задачи, то есть поиск контролируемого выхода из проблемной ситуации, в определенном отношении отображается в ЯПД в переосмыслении лексических значений. Зарождение мысли (постановка задачи) осуществляется в языке ПИБ. Представление так же, как и ресурс, который оно представляет, может стать предметом бесконечного числа высказываний, что затрудняет речь, но побуждает к высказыванию.

3. Механизм мышления человека-оператора реализуется в двух противостоящих динамических звеньях – предметно-изобразительном коде (внутренняя речь) и речедвигательном коде (экспрессивная речь). В первом звене мысль задается, во втором она передается и снова задается для первого звена. Именно эта двухзвенность механизма мышления человека-оператора резко отличает его от искусственных устройств с применением формально-логических средств переработки поступившей информации. Понимание – перевод с ЯПД на внутренний язык. Обратный перевод – высказывание.



Структурирование языка отношений и связей ОТУ

Одна из возможных предметно-ориентированных концептуальных схем для структурирования ЯОС ОТУ показана на рисунке 5, а.



а



б

Рис. 5. Отображение концептуальной схемы языка отношений и связей ОТУ в схему «Система ОТУ» региональной интеллектуальной электроэнергетики: а – концептуальная схема для структурирования ЯОС: овалы – вершины – концепты знаний об объективных и субъективных ресурсах, свойствах и действиях; отрезки прямых линий и петли – концепты о субъективных, чувственно не воспринимаемых отношениях и связях ресурсов, свойств и действий; б – система ОТУ ЭС, в состав субъекта управления которой входит «амплинус-партнер» – когнитивная гибридная интеллектуальная система: ППС – преобразователь в прямой связи; ОУ – объект управления; ПОС – преобразователь в обратной связи



Схема получена внесением актуальных для мира ОТД изменений в схему, представленную в работе [6, с. 83]. Понимать концептуальную схему на рисунке 5, а следует в двуединстве категориального базиса ЯОС ОТУ (ПИБ и ВПБ), а вершины-овалы — как концепты, «сгустки» информации, кванты знания (по З.Д. Поповой и И.А. Стернину). Иными словами, каждый концепт, отраженный на схеме, включает три составляющие: понятийную, образную и ценностную (прагматическую), причем центральное место ядра отдано образному, схематизированному представлению, а периферийное — понятийному, словесному окружению. Проще говоря, гипотетически предлагается сменить парадигму раскрытия онтологической семантики объективной и субъективной реальности исключительно языковыми, предикативными, последовательными средствами на парадигму комбинирования, интегрирования их с предметно-изобразительными инструментами, а также перейти к эксплуатации в ОТУ интеллектуальной электроэнергетики формулы «содержание знака = изображение + текст». Последняя, ценностная составляющая специфицируется как трансформация, демпфирование содержания знака «когнитивный образ объекта ОТУ» в содержание знака «оперативный образ объекта ОТУ». Отрезками прямых линий и привершинными петлями на схеме обозначены концепты классов отношений и связей, понимаемых аналогично вершинным концептам, содержание которых раскрывается по такой же формуле. На ней отображено восемь взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом схем, названных моделями миров, чтобы подчеркнуть определенную связь с моделью мира ОТД для организации системы ОТУ в региональной интеллектуальной электроэнергетике.

На нижнем уровне показана модель мира измерений (действий) значений свойств-параметров посредством мер. От совершенства измерений во многом зависит и качество ОТУ в региональной интеллектуальной электроэнергетике: для совершенной системы измерений может быть построена и совершенная система интеллектуального управления. Мир измерений связан с миром ресурсов, свойств, действий и операций трехролевой моделью «значение — мера — свойство», изображенной в вертикальной плоскости, что отображает телеметрию информации в мир ресурсов, свойств, действий и операций, представлений и трансформации когнитивного и оперативного образов уже в другой информационной модели. В этом мире актуальны концепты *состав, иерархия, структура, процесс, маршрут, сеть, место* (где находится ресурс), *расположение* (пространственное отношение ресурса и окружения), *положение* (ресурса относительно других статичных ресурсов).

Над миром ресурсов, свойств и действий отражены еще два мира: мир событий и ситуаций и мир состояния, поведения и режимов. В первом из них существуют знаки событий — мгновенных действий, значимых для субъекта ОТУ изменений в окружающей объективной реальности, в его поведении и внутреннем мире, и знаки ситуаций — сочетаний условий и обстоятельств, создающих определенную обстановку, положение. Во втором существуют знаки несколько других



представлений, обнаруживаемых через «мгновенное сечение» параметров элементов электросети, например через электродвижущую силу источников и задающие токи (мощности) нагрузок ОГУ, — то есть знаки состояний, а также знаки параметров режима (например, значения частоты, токов в ветвях, напряжений в узлах, полной, активной и реактивной мощностей электропередачи, несимметрии, несинусоидальности) и поведения (траекторного движения состояний).

Субъект ОГУ в схеме многоуровневой концептуальной модели представлен мирами задач и проблем и их решений. Задача (англ. problem) в понимании В.Ф. Спиридонова [20] — психологическая конструкция: 1) условие запуска мыслительного процесса; 2) форма взаимодействия с неопределенностью. Концепт «однородная задача» (англ. homogeneous problem) — объект внутреннего мира субъекта ОГУ, ментальная конструкция, не содержащая частей (других задач), отличающихся по составу или свойствам. Проблема (англ. complex problem, ill-structured problem), по В.Ф. Спиридонову, — затруднительные условия без явно сформулированной цели или четкая цель, не связанная со сложившимися неблагоприятными условиями. Концепт «проблема» по содержанию ближе к категориям обусловленности, причины, а концепт «задача» — к категориям результативности, следствия и действия. Концепт «неоднородная задача» (англ. heterogeneous, inhomogeneous problem) — это объект внутреннего мира субъекта ОГУ, характеризующийся количественной и качественной различимостью состояния субстанции средствами разума, это ментальная конструкция-система из однородных (обслуживающих) задач, отображенная отношениями деконпозиции. В этом мире актуальны концепты *цель* (образ, идеальный или мысленно представленный конечный результат деятельности, то, чего нет еще реально, но что должно быть получено в ее итоге [21]), *функция* (фаза) *управления*¹ (тип управленческой деятельности, характеризующей той или иной активностью взаимодействия субъекта и объекта ОГУ, реализуемой приемами, методиками, организацией действий и операций), *оценка*, *ценности*, *убеждения*, *предпочтения*, *эмоции*, *мотивы* и *желания*.

Мир решения задач и проблем отображен триадой «задача (проблема) — метод — решение». Мир решения в этой триаде специфичен и для субъекта ОГУ избыточен в том смысле, что концепт «метод» для успешной работы субъекту ОГУ не нужен: ему не требуется ни сознательное управление психологическими механизмами, ни даже знание о них [20]. Реальный психологический механизм — автономный (во многом независимый от сознательного управления), результативный, несущий предметно-смысловое содержание, обладающий пространственной и временной ориентацией психический процесс. Основная функция психологического механизма решения — преобразование содержания задачи или проблемы, обеспечивающее достижение искомо-

¹ Российская школа выделяет следующие функции: целеполагание, учет, контроль, анализ, нормирование, прогнозирование, регулирование, планирование, организация, координация, мотивация, коммуникация и принятие решений),



го результата [20]. В.В. Петухов [22] называет три принципиальных мыслительных механизма, обеспечивающих решение разноплановых задач: 1) случайный (решение задачи происходит случайно на основании неожиданного совпадения каких-либо элементов проблемной ситуации и элементов прошлого опыта или собственных действий решателя); 2) целенаправленный (появление цели упорядочивает поток ассоциаций и жестко подчиняет его логике движения к ней); 3) целостный (усмотрение конфликта в структуре задачи-системы «заставляет» решателя двигаться в определенном направлении, перебирая способы разрешения конфликта в рамках целого до момента обнаружения решения (инсайта), связанного обычно с ярким переживанием).

В отличие от задачи, решение проблем, согласно по В.Ф. Спиридонову, — сложный, многосторонний процесс, исследования психологических механизмов которого в литературе представлены весьма ограниченно и включают самоопределение решателя и изменение представления проблемы (ее переработку) в ходе решения [20].

Первый механизм учитывает, что сам человек — принципиальная часть проблемы, с которой он сталкивается. Понятие «самоопределение» фиксирует собственную позицию решателя (индивидуального или группового) по следующим вопросам: содержание проблемы и его место в ней; процедура разрешения; требуемые результаты; уточнение субъективных координат и состава проблемного поля, своего места в поле; прояснение формулировки проблемы и итоговой цели; описание критериев успешного результата; определение зон ответственности за достижение решения; самоопределение по ценностям и интеллектуальная работа по выбору или построению этой позиции.

Второй механизм связан с замещением проблемы ее субъективным аналогом — представлением проблемной ситуации (декомпозицией), то есть осмысленной, относительно устойчивой, непосредственно данной решателю мыслительной конструкцией, направляющей и упорядочивающей процесс решения. В такой модели совмещается разнообразие информации о ресурсах, времени, целях, ценностях, убеждениях, эмоциях и т.д., из которых строится проблемная ситуация. В ней подчеркиваются одни моменты и маскируются другие. У экспертов представление проблемы — это связанная и иерархически выстроенная система обслуживающих задач, предопределяющих средства своего решения. Успешность преодоления проблемы зависит от качества системы задач, в которую ее удастся коллективно превратить. Построение такой системы в конкретном случае, для конкретной проблемной ситуации носит название планирования. Именно наличие декомпозированного представления достаточно четкой и разветвленной системы задач — необходимое свойство решенной проблемы.

Очевидно, что мир решений должен быть связан еще с одним миром — исполнения оперативных действий, в котором реализуются решения задач операциями в объекте ОТУ. Мир исполнения не показан на рисунке 5, а, однако это не значит, что его концептуальная схема проще, чем для других миров.



Еще одна специфическая онтологическая особенность семантики мира решения задач и проблем заключается в том, что составляющий триаду «задача (проблема) — метод — решение» концепт «метод» является одновременно и составной частью триад «задача (проблема) — метод — моделирование» мира методов моделирования и «метод — свойство — моделирование» мира субъектов моделирования. Если в мире решения задач концепт «метод» раскрывает свое содержание как «реальный психологический механизм» решения задачи (проблемы) человеком — оператором ОТУ, то в мирах субъектов моделирования и методов моделирования содержание этого концепта иное: метод (от греч. *methodos* — путь исследования или познания, теория, учение) — совокупность приемов и операций практического или теоретического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи (проблемы) [23]. «Кроме убеждений, нужны знания, которые можно приобрести, и методы, которые можно освоить», — утверждал Б. Брехт. Среди многообразия научных методов одно из ведущих мест занимает моделирование — исследование объектов познания на их моделях. Работы российских и зарубежных ученых привели к разработке огромного многообразия методов, применяемых для моделирования решения задач в больших системах. Однако, по мнению многих специалистов, в частности О.И. Ларичева [24], наиболее заметное влияние на развитие методов моделирования деятельности человека в системах управления оказывают исследование операций, системный анализ, ИИ и принятие решений. Многообразие мира методов моделирования и, как следствие, моделей, наработанных в научных школах для многих предметных областей, следует отнести к одному из самых заметных результатов XX столетия. Однако именно из-за многообразия эти достижения бываете подчас трудно использовать на практике, поскольку это требует от исследователя прежде всего широкого кругозора для сравнительного анализа и выбора метода в сочетании с глубокими знаниями конкретного инструментария, а также тенденций развития мира методов моделирования в целом. Рожденный в умах ученых метод, носящий в силу этого, безусловно, какие-то личностные черты своего создателя, будучи формализованным на некотором языке, будь то язык математики, моделирующих алгоритмов или др., начинает свою «жизнь» в мире методов моделирования. В жизни применительно к миру задач проявляется его ограниченность, то есть достоинства и недостатки, сильные и слабые стороны. Будучи изученным другими специалистами, имеющими свое субъективное видение внешнего мира, свои профессиональные знания, метод может быть ими несущественно модифицирован либо качественно видоизменен настолько, что превратится уже в другой, новый метод. Такая деятельность в мире методов моделирования приводит к явлениям, когда чистый метод (первооснова) очень скоро просто перестает существовать, в буквальном смысле впитывая в себя многочисленные «дополнения» и «изменения», как правило заимствуемые из других методов, в которых недостатки, характерные для метода-оригинала, отсутствуют. В итоге в мире методов моделирования



происходят изменения методов-сущностей, вызванные корректировкой свойств методов. Эти изменения можно назвать мутацией метода. Кроме мутации миру моделирования присущи и такие явления, как отбор методов-родителей для разработки нового метода-потомка, а также оценка метода-потомка с точки зрения поставленных создателями целей. Данный процесс можно рассматривать как эволюцию популяции методов в мире методов моделирования и попытаться распространить на него подходы, принятые в генетике. Для этого необходимо прежде всего обратиться к микро- и макропредставлениям.

Один из первых шагов к микроуровневому представлению метода был сделан в классификации, группирующей методы по схеме-модели, языку описания модели и процедурам поиска (получения) решения на модели, открывающим путь к объяснению таких явлений, как «появление нового класса методов», «приспособленность метода», «развитие новых методов за рамками ограничений существующих методов» и др. [6]. Схема — концептуальное описание в некоторой теории (например, «система массового обслуживания», «операция», «игра»). Язык описания модели включает базовые и производные от них знаки, имеет грамматику. Процедура решений на модели — деятельностная, алгоритмическая составляющая, реализующая путь к результату и формирующая разнообразие методов.

Метод и модель — два тесно взаимосвязанных друг с другом объекта. С одной стороны, будучи разработанной в соответствии с некоторым методом, модель, а далее и машинная программа всегда будут несвободны, связаны его свойствами, наследуя все его плюсы и минусы. С другой стороны, будучи созданной, модель выступает в роли метода, инструмента решения задач, и вполне естественно, что метод приобретет свойства модели. Более того, метод не может выйти за рамки своей концептуальной модели и наследует от нее структурирование внешнего мира, понятийный аппарат, что во многом определяет силу и возможности метода. По существу, спецификация метода — ограничения некоторой ниши в популяции методов. Если речь идет о выборе метода для решения задачи, то выход за пределы ниши означает, что ограничения, введенные в схеме концептуальной модели метода, не устраивают разработчика (например, слишком сильные и модель может получиться неадекватной оригиналу) и он вынужден искать инструмент за пределами ниши. Он может продолжить процедуру выбора, перейдя в другую, третью и т.д. ниши, и это, возможно, приведет к тому, что необходимый компромисс «ограничения — адекватность» будет найден и метод, наконец, будет идентифицирован.

Однако при решении проблем, то есть неоднородных задач — систем, значительно чаще компромисса достичь не удается. Поиск по нишам ничего не дает, и возникает необходимость выхода за рамки ограничений уже известных методов. Для проблемы, с изменчивостью ее состава и структуры, нет и не может быть релевантных ниш, а метод ее решения должен быть получен конструированием структуры над некоторой совокупностью ниш. В пределах одной ниши могут быть построены модели, которые Л. Медскер называет автономными [25],



чтобы подчеркнуть их несвязанность (автономность) с другими моделями, построенными в соответствии с нишевыми, автономными методами. Автономный базис — некоторое количество классов методов моделирования, предназначенных для использования в мире субъектов моделирования с целью создания разнообразия генетического материала при синтезе интегрированных методов и моделей. Таких классов семь: фундаментальные аналитические зависимости, имитационное статистическое моделирование, экспертные системы (англ. Knowledge Based Systems — системы, использующие для рассуждений базы знаний), нечеткие системы (англ. Fuzzy Logic Systems — системы нечеткого моделирования посредством нечеткого вывода), искусственные нейронные сети (англ. Artificial Neural Nets — сетевая модель, состоящая из математических моделей биологических нейронов, способная обучаться на примерах, адаптируя свои параметры и извлекая и фиксируя знания из примеров), генетические алгоритмы (англ. Genetic Algorithms — алгоритмы, оперирующие с рядами бинарных цифр (нулей и единиц), имитирующие эволюцию на популяции хромосом и использующие механизмы селекции и репродукции по аналогии с живой природой) и СВР-системы (англ. Case Based Reasoning — рассуждения на основе прецедентов).

Концепт «метод» входит и как составляющая в триаду мира субъектов моделирования. При этом, следуя междисциплинарной «теории больших систем» Г.С. Пospelова, социальным взглядам на природу интеллекта М. Минского, принципам организационно-системного подхода в ИИ В.Б. Тарасова и гибридного интеллекта В.Ф. Венды, деятельность разработчика «автоматического партнера» (по Р. Шенку [26]) или «амплинус-партнера» (от лат. *amplifico* — ‘увеличивать, усиливать’ и др.-греч. νοῦς — ‘мысль, разум, ум’) диспетчера-оператора ОТУ (рис. 5, б) рассматривается в контексте интегрированных интеллектуальных систем, по Г.В. Рыбиной [27], и гибридных интеллектуальных систем (ГиИС), по А.В. Колесникову [6]. Наконец, на верхнем уровне показан еще один мир — мир моделирования. Это уже не мир системы ОТУ региональной ЭС, это мир проектирования системы интеллектуального управления региональной электроэнергетикой. Основные роли в нем играют субъекты моделирования — модельеры (постановщики задач, алгоритмисты, программисты и др.), владеющие некоторым количеством, а может быть, и одним-единственным методом решения задач.

К настоящему времени термин «интеграция» широко применяется в информатике, биологии, физике, химии, в политике, социальной и культурной сферах. Самое простое и наиболее широко употребляемое значение этого термина — объединение, взаимопроникновение.

Интеграция (от лат. *integer* — полный, цельный, ненарушенный) — процесс или действие, имеющие своим результатом целостность; объединение, соединение, восстановление единства [28]. Интеграция носит характер инсайта, высвечивания какого-то пространства светом осознания, как фонарик высвечивает из тьмы какое-то пространство: у од-



ного субъекта фокус этого фонаря четок, ясен, у другого — рассеян; у одного свет сильный, как прожектор, у другого — слабый и еле теплится [29].

Интегрированный метод — подмножество отношений интеграции, заданное на множестве генотипов автономных методов, содержащем минимум две структуры методов работы с различными видами знаний [6].

Интегрированная модель — некоторое подмножество отношений интеграции, заданное на множестве автономных моделей, содержащем минимум две модели с различными видами знаний.

Элемент (компонент) ГиИС — модельный ресурс одного из автономных базисов ГиИС для моделирования решения однородной задачи (функциональный или технологический).

Гетерогенное модельное поле (ГМП) — множество элементов ГиИС, построенных на как минимум двух разных классах методов автономного базиса. ГМП может быть функционально избыточно и включать несколько функциональных элементов для решения одной и той же однородной задачи.

Архитектура ГиИС — упорядоченное в соответствии с декомпозицией проблемы ГМП с технологическими элементами межмодельного интерфейса.

Гибридная интеллектуальная система, по А. В. Колесникову, — схема, способ видения мира, неоднородность информации, касающаяся организации пространства [30], система, в которой для решения задачи используется более одного метода имитации интеллектуальной деятельности человека [31].

Однако ГиИС не способны задействовать правосторонние, предметно-изобразительные (визуально-образные) представления и рассуждения оператора, заставляя его мыслить исключительно логически, не обеспечивают интуитивное принятие решений на основе демонстрируемого образа проблемной ситуации и предлагаемых вариантов ее понимания. В этой связи Калининградская школа ИИ свои усилия направляет на фундаментальную научную задачу развития теории интеллектуального управления технологически сложными, динамическими объектами в условиях разнообразия и неопределенности информации, в частности на отдельные аспекты этой теории: 1) создание новых эффективных, интегрированных моделей представления знаний и организация мягких вычислений методами ГиИС; 2) когнитивное моделирование механизмов категоризации, концептуализации, структурирования, трансформации, именования и деформации когнитивных и оперативных образов ситуаций и состояний; 3) методологии и технологии разработки и применения нового класса систем ИИ, когнитологии и когнитивной инженерии — *когнитивных гибридных интеллектуальных систем (КГиИС)*.

Центральная задача когнитологии состоит в создании когнитивных технологий — высокотехнологичных инструментов и процедур, улучшающих оценку актуальной ситуации человеком-оператором и результативность его деятельности [32].



Когнитивная эргономика (КЭ, когнитивная инженерия) изучает психические процессы (восприятие, память, мышление) и двигательные реакции (действия), влияющие на взаимодействие человека и других элементами системы «человек – машина». В предметную область КЭ входят когнитивный анализ задачи, умственная нагрузка, диагностика, понимание, принятие решений, планирование, производительность труда, взаимодействие «человек – машина», надежность человека-оператора, стресс и обучение, дизайн человеко-машинных систем [33]. Когнитивная эргономика (иногда известная как когнитивная инженерия) уделяет особое внимание анализу когнитивных процессов, необходимых операторам в современных сложных системах с высокой динамикой технологических процессов, а именно диагностике, пониманию ситуации, принятию решений и планированию, когнитивному анализу задачи (методам выявления психических потребностей и познавательных навыков для выполнения задачи). Инструменты КЭ: дизайн «человек-машина», ориентированный на пользователя и взаимодействие человека-оператора и компьютера; информационно-технологические системы, поддерживающие когнитивные артефакты; управление познавательной нагрузкой, надежность человека-оператора. Пионером когнитивной инженерии считается Энид Мамфорд (англ. Enid Mumford), британский социолог, профессор Манчестерского университета.

Когнитивный искусственный интеллект – самообучающийся или самосовершенствующийся ИИ. В рамках ИИ разрабатываются искусственные когнитивные системы, накапливающие знания в процессе обучения [34].

Когнитивная система – компонент сознания / разума человека и его общей человеческой когниции, обладающий собственными механизмами и сферами действия, характеризуемый как результат взаимодействия определенного набора модулей [35].

Когнитивное моделирование – построение когнитивной модели речи, зрительного восприятия и т.д., характеристика процесса категоризации в естественном языке. Когнитивные модели бывают пропозициональные, схематические (образные), метафорические и метонимические [35]. Когнитивное моделирование предполагает исследование сущности когнитивных функций в широком смысле посредством их эмпирического изучения и моделирования [36].

В рамках рассмотренной терминологии можно дать следующее максимально общее и разумное определение КГиИС.

Когнитивная гибридная интеллектуальная система – гибридная интеллектуальная система, элементы гетерогенного модельного поля которой комбинируют предметно-изобразительные и предикативно-вербальные представления, над которым ситуативно синтезируются интегрированные модели, используемые в двухзвенном механизме понимания и высказываний в качестве метода разрешения возникшей проблемы.



Идея КГиИС высказана в 2009–2012 гг. основателем инженерии образов И.Б. Фоминых [37]. В 2015 г. А.В. Колесников и В.И. Данишевский предложили архитектурную схему ГиИС с когнитивной компонентой для мониторинга и управления качеством электроэнергии [38]. В 2017 г. опубликовано несколько работ: А.Н. Аверкин, С.А. Ярушев и В.Ю. Павлов создали модели для поддержки принятия решений в динамических ситуациях со слабой структурированностью, основанной на гибридной системе, интегрирующей нечеткую иерархическую модель оценивания и нечеткую когнитивную модель ситуации [39]; С.В. Ульянов с соавторами разработали гибридные когнитивные нечеткие системы управления автономным роботом [40]; Л.В. Массель и В.Р. Кузьмин предложили семиотический подход к интеграции методов ситуационного управления, семантического моделирования и когнитивной графики применительно к электроэнергетике [41]. В 2012–2018 гг. А.А. Башлыков и А.П. Еремеев создали интегрированную интеллектуальную систему реального времени «СПРИНТ-РВ» с когнитивной составляющей «глобус Башлыкова» [42].

Заключение

С опорой на параметрическую общую теорию систем и логическое исчисление на двух триадах категорий А.И. Уёмова – «вещь, свойство, отношение» и «определенное, неопределенное, произвольное», а также на современное содержание и употребление терминов «концепт» и «концептосфера» З.Д. Поповой и И.А. Стернина и универсальный предметный код Н.И. Жинкина специфицированы категориальное ядро «ресурс, свойство, действие», символизм базовых форм и предметно-изобразительное кодирование двуединого категориального базиса ЯОС объекта ОТУ.

Уточнена и детализирована применительно к специфике объекта ОТУ ЭС концептуальная схема ЯОС и разработано ее отображение в схему «Система ОТУ», субъект управления которой включает «амплинус-партнера» – когнитивную гибридную интеллектуальную систему, толкование содержания которой дано в рамках когнитивной инженерии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00208.

Список литературы

1. Колесников А.В., Румовская С.Б., Ясинский Э.В., Солдатов С.А. Интеллектуализация оперативно-технологического управления региональной электроэнергетикой методами когнитивных гибридных интеллектуальных систем. Часть 1 // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2020. №3. С. 57–87.
2. Колесников А.В., Румовская С.Б., Ясинский Э.В., Демьянец Р.В. Интеллектуализация оперативно-технологического управления региональной электроэнер-



гетикой методами когнитивных гибридных интеллектуальных систем. Часть 2 // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канга. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2020. №3. С. 38–50.

3. Уёмов А.И. Вещи, свойства, отношения. М., 1963.
4. Брон О.Б. Поле как вид материи // Электричество. 1954. №7. С. 3–10.
5. Федоров В.К. Материя, разум, бог // Омский научный вестник. 2001. №12. С. 58–59.
6. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / под ред. А.М. Яшина. СПб., 2001.
7. Гальперин П.Я. Методы обучения и умственное развитие ребенка. М., 1985.
8. Меццарьякова Б.Г., Зинченко В.П. Большой психологический словарь. М., 2003.
9. Ожегов С.И. Словарь русского языка / под ред. Н.Ю. Шведовой ; 9-е изд., испр. и доп. М., 1972.
10. Кавинкина И.Н., Анисимова Е.А. Глагол. Наречие. Служебные части речи и другие классы слов : учеб. пособие. Гродно, 2010.
11. Русский язык : в 2 ч. Ч. 2 : Синтаксис : учеб. для студ. сред. пед. учеб. заведений / Земский А.М. [и др.] ; 13-е изд., стер. М., 2000.
12. Визуализация подстанции // Кафедра ЭЭ НФ МИСиС. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=L1pldj2hg7Y> (дата обращения: 20.10.2020).
13. Штейнбок Л.С. Ситуационная технология отображения информации. М., 2017.
14. Колесников А.В., Листопад С.В. Концептуально-визуальные основы виртуальных гетерогенных коллективов, поддерживающих принятие решений // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : матер. III Всерос. Поспеловской конф. с междунар. участием / под ред. А.В. Колесникова. Калининград, 2016.
15. Григорьева Т.П. Китай, Россия и Всечеловек. М., 2011.
16. Попова З.Д., Стернин И.А. Лексическая система языка: Внутренняя организация, категориальный аппарат и приемы описания : учеб. пособие. М., 2011.
17. Жинкин Н.И. Речь как проводник информации. М., 1982.
18. Знаковая картина мира субъекта поведения / Г.С. Осипов, А.И. Панов, Н.В. Чудова, Ю.М. Кузнецова. М., 2018.
19. Слышкин Г.Г. Лингвокультурные концепты прецедентных текстов. М., 2000.
20. Спиридонов В.Ф. Психология мышления: Решение задач и проблем : учеб. пособие. М., 2006.
21. Завалова Н.Д., Ломов Б.В., Пономаренко В.А. Образ в системе психической регуляции деятельности. М., 1986.
22. Петухов В.В. Психология мышления : учеб.-метод. пособие. М., 1987.
23. Спиркин А.Г. Метод // Большая Советская энциклопедия. Т. 16. М., 1974. С. 162.
24. Ларичев О.И. Объективные модели и субъективные решения. М., 1987.
25. Medsker L. R. J. Hybrid Intelligent Systems. Kluwer Academic Publ., 1995.
26. Schank R. C., Hunter L. The quest to understand thinking // Byte. 1985. №10 (4). P. 143–155.
27. Рыбина Г.В. Интегрированные экспертные системы: современное состояние, проблемы и тенденции // Известия РАН. Теория и системы управления. 2002. №5. С. 111–126.
28. Интеграция // Философский энциклопедический словарь. URL: <https://rus-philosophy-enc.slovaronline.com/993-интеграция> (дата обращения: 18.04.2021).
29. Козлов В. В., Донченко И. А. Направленные визуализации: теория и метод. Запорожье, 2015.



30. Колесников А.В. Функциональные гибридные интеллектуальные системы визуального управления // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы : матер. IV Всерос. Пospelовской конф. с междунар. участием. Калининград, 2018. С. 18–81.
31. Гибридные адаптивные интеллектуальные системы. Ч. 1: Теория и технология разработки : монография / П.М. Клачек, С.И. Корягин, А.В. Колесников, Е.С. Минкова. Калининград, 2011.
32. Величковский Б.М., Вартанов А.В., Шевчик С.А. Системная роль когнитивных исследований в развитии конвергентных технологий // Вестник Томского государственного университета. 2010. №334. С. 186–191.
33. Когнитивная эргономика. URL: https://ru.qwertyu.wiki/wiki/Cognitive_ergonomics (дата обращения: 18.04.2021).
34. Станкевич Л.А., Юревич Е.И. Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике : учеб. пособие. СПб., 2012.
35. Краткий словарь когнитивных терминов / Е.С. Кубрякова, В.З. Демьянков, Ю.Г. Панкрац, Л.Г. Лузина ; под общ. ред. Е.С. Кубряковой. М., 1997.
36. Г.С. Осипов. Методы искусственного интеллекта. М., 2011.
37. Фоминых И.Б. Инженерия образов, творческие задачи, эмоциональные оценки // Онтология проектирования. 2018. Т. 8, №2. С. 175–189.
38. Колесников А.В., Данишевский В.И. Моделирование коллективного принятия решений в региональной энергосистеме методами гибридных интеллектуальных систем с когнитивной компонентой / Шестая Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» (15–20 июня 2015 г., г. Светлогорск, Россия) : тр. конф. : в 2 т. М., 2015. Т. 2. С. 17–23.
39. Аверкин А.Н., Ярушев С.А., Павлов В.Ю. Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования // Программные продукты и системы. 2017. №4. С. 632–642.
40. Ульянов С.В., Решетников А.Г., Мамаева А.А. Гибридные когнитивные нечеткие системы управления автономным роботом на основе нейроинтерфейса и технологии мягких вычислений // Программные продукты и системы. 2017. №3. С. 420–424.
41. Массель Л.В., Кузьмин В.Р. Ситуационное исчисление как развитие семиотического подхода к построению интеллектуальной системы поддержки принятия решений // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер.: Информационные технологии. 2017. Т. 15, №4. С. 43–52.
42. Башлыков А.А., Еремеев А.П. Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике : учебник. М., 2018.

Об авторах

Александр Васильевич Колесников – д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: avkolesnikov@yandex.ru

София Борисовна Румовская – канд. техн. наук, науч. сотр., Калининградский филиал ФИЦ ИУ РАН, Россия.

E-mail: sophiyabr@gmail.com

Эрик Викторович Ясинский – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта; ведущий разработчик, ООО «Роуттех», Россия.

E-mail: ejasinski96@gmail.com



Александр Вадимович Барзенков — ассист., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: cbv-k@mail.ru

The authors

Prof. Alexander V. Kolesnikov, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: avkolesnikov@yandex.ru

Dr Sophiya B. Rumovskaya, Research Fellow, Kaliningrad branch of the FRC «Computer Science and Control» of the RAS, Russia.

E-mail: sophiyabr@gmail.com

Eric V. Yasinsky, PhD Student, Immanuel Kant Baltic Federal University; Lead Developer, Ltd «Routtech», Russia.

E-mail: ejasinski96@gmail.com

Alexander V. Barzenkov, Assistant, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: cbv-k@mail.ru

М. Г. Филатова, В. А. Алецкая, С. Г. Шпилевая

**ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КАЧЕСТВЕННОЙ МОБИЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗЬЮ
ПЕРИФЕРИЙНОГО НАСЕЛЕННОГО ПУНКТА
КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

66

Поступила в редакцию 02.04.2021 г.

Рецензия от 16.04.2021 г.

Проанализированы проблемы, связанные с обеспечением устойчивой мобильной радиосвязью удаленных от областного центра населенных пунктов, расположенных на побережье Балтийского моря. На примере поселка городского типа Янтарный обоснована целесообразность внедрения сетей пятого поколения (5G). На основании учета физических процессов распространения радиоволн соответствующих частотных диапазонов, с учетом плотности застройки и рельефа местности выполнены расчеты зон уверенного радиоприема на исследуемой территории, определено оптимальное расположение базовых станций сотовой связи, обоснован выбор оборудования.

The paper analyzes the problems associated with the provision of stable mobile radio communication in remote settlements located on the Baltic Sea coast. On the example of the urban - type settlement of Yantarny, the expediency of implementing fifth-generation networks-5G-is justified. On the basis of accounting for the physical processes of radio wave propagation of the corresponding frequency ranges, taking into account the density of buildings and terrain, calculations of the zones of confident radio reception in the study area were performed, the optimal location of cellular base stations was determined, and the choice of equipment was justified.

Ключевые слова: радиоприем, мобильная радиосвязь, сети 5G (пятого поколения), диапазон частот, базовая станция, затухание сигнала

Keywords: radio reception, mobile radio-communication, 5G networks (fifth generation), frequency range, base station, signal attenuation

Одной из актуальных задач развития информационной инфраструктуры периферийных районов Калининградской области является их обеспечение надежной связью, гарантирующей предоставление абонентам качественных услуг и сервисов. Исходя из этого выполнена оценка существующего уровня развития сетей мобильной радиосвязи в одном из наиболее динамично развивающихся населенных пунктов прибрежной зоны – поселке городского типа Янтарный. Занимаемая поселком площадь – 26 км², официальная численность населения –



5557 жителей (за счет приезда отдыхающих в курортные периоды численность значительно возрастает). Специфика населенного пункта заключается в неоднородной плотности застройки, наличии нескольких парковых зон с достаточно высокой растительностью, а также обширной пляжной территории, где отсутствуют возможности организации проводной связи и, соответственно, востребованы услуги мобильной радиосвязи. В некоторых районах Янтарного помимо мобильных операторов действуют провайдеры, предоставляющие доступ к домашнему интернету.

Первичный анализ зон покрытия сетей, расположенных на рассматриваемой территории, показал, что мобильная связь в поселке реализуется посредством четырех операторов («Билайн», «МегаФон», «МТС», «Tele2»); в незначительной степени представлена сеть «Yota». На основании этого можно предполагать, что абоненты должны в достаточной степени обеспечиваться высокоскоростной мобильной связью 4-го поколения. Для оценки качества предоставляемых услуг выполнены тестовые измерения скорости передачи данных в сетях 4G. Измерения производились в жилых зданиях, расположенных вне зон прямой видимости базовых станций (БС) [1], при помощи абонентских устройств [2]. Анализ данных, полученных при помощи устройства Samsung Galaxy A10, позволяет считать, что оператор «Tele2» обеспечивает удовлетворительную скорость загрузки и передачи данных и относительно малую задержку. Оператор «МегаФон» в поселке Янтарном предоставляет высокоскоростную связь до 100 Мбит/с, качество которой тестировалось аналогичным способом и также показало в целом положительные результаты.

Аналогичным образом были измерены скорости передачи данных в сетях 2G, 3G и 4G, обслуживаемых ПАО «МТС» и обеспечивающих поселок голосовыми услугами и другими сервисами. Тестирование, выполняемое абонентским устройством Sony Xperia, проводилось на открытой местности. При этом параметры передачи оказались значительно хуже, чем у двух предыдущих операторов. Составление карты зон покрытия позволило сделать вывод, что качество услуг ПАО «МТС» в Янтарном не удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым абонентами к качеству сотовой связи, данная сеть обеспечивает наихудшую из рассматриваемых операторов среднюю скорость передачи данных и загрузки, вносит высокую задержку.

Для понимания причин указанных выше недостатков проведем более подробный анализ расположенных в поселке базовых станций (БС) и мачтовых сооружений сотовой связи (рис. 1). Как показывает анализ, на территории Янтарного располагаются 7 БС, принадлежащих различным операторам, что теоретически позволяет:

- а) в основном обеспечить жителей и гостей поселка связью второго и третьего поколений;
- б) частично обеспечить территорию услугами связи 4G.

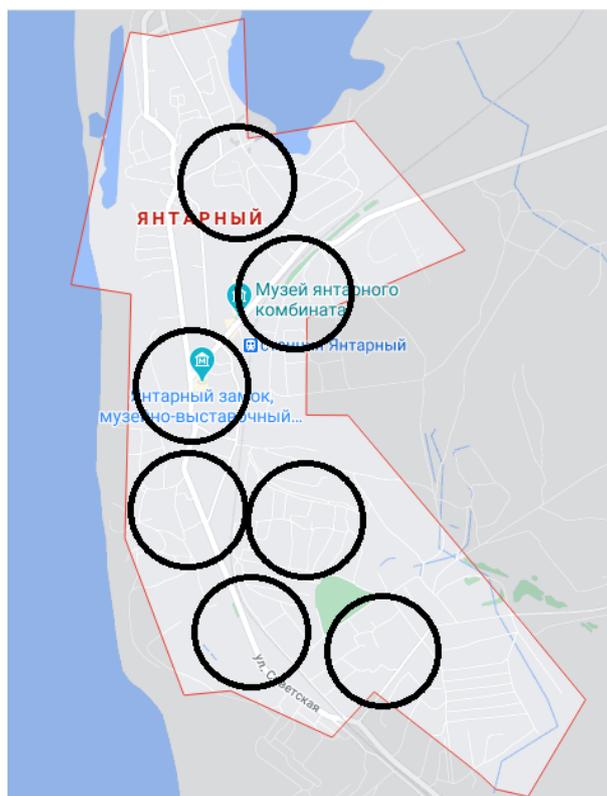


Рис. 1. Существующее расположение базовых станций в поселке Яantarный

Учитывая интенсивное развитие населенного пункта как курортно-туристической зоны можно заключить, что для реализации наиболее востребованных телекоммуникационных услуг и сервисов необходимо расширить и модернизировать существующие сети мобильной радиосвязи.

Реализовать подобное развитие возможно путем внедрения на исследуемой территории сетей пятого поколения – 5G [3], преимуществами которых являются более совершенные антенные технологии и более высокая пропускная способность каналов. На текущий момент разработаны и успешно внедряются три основных варианта таких сетей [4], отличающиеся друг от друга диапазонами используемых частот: низкочастотный, среднечастотный и высокочастотный. Самая распространенная из них – низкочастотная неавтономная версия NSA 5G, функционирование которой незначительно отличается от 4G и позволяет использовать те же самые технические сооружения, кроме «автономной» радиосистемы, известной как 5G-NR [3; 4]. За исключением Sprint, соты 5G-носителей имеют иную форму, чем у 4G, поэтому они теряют покрытие там, где отключается 4G-сигнал. Переход сети 5G в автономный режим может сопровождаться скачкообразным увеличе-



нием зон городского покрытия. Для наиболее быстрого и эффективного внедрения сетей пятого поколения требуется использование уже существующих полос радиочастот эволюционных сетей LTE-Advanced. Приказ Минкомсвязи России «Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации» [5] как ключевой регламентирующий документ определяет приоритетные для внедрения 5G частотные диапазоны. Тем не менее использование некоторых из них на текущий момент является трудновыполнимой задачей.

Первый из упомянутых диапазонов частот (694–790 МГц) позиционируется в качестве основного. Он включен в Дорожную карту Евросоюза по внедрению сетей 5G/IMT-2020 [6].

Второй диапазон (790–862 МГц) используется для целей военного и специального назначения, вследствие чего планирование сетей на эти частоты в данный момент представляется проблематичным.

Третий диапазон (1–6 ГГц) обладает хорошими характеристиками распространения радиоволн в условиях сельской, пригородной и городской местности, обеспечивает достаточно широкую полосу частот для организации высокоскоростных каналов с шириной спектра до 100 МГц, причем в этой полосе для внедрения сетей пятого поколения рассматриваются полосы 3400–3600 МГц, 3600–4400 МГц, 4400–5000 МГц.

Частоты свыше 6 ГГц предназначены для организации сверхвысокоскоростных каналов связи на небольших расстояниях от БС за счет использования каналов с шириной спектра до 400 МГц (разнос поднесущих частот SCS равен 240 кГц) при обеспечении сверхмалых задержек. Проблемой данного диапазона является значительное ослабление сигнала при распространении. Помимо этого, частоты 24,25–29,5 ГГц предназначены для обеспечения покрытия в хот-спотах, а также для обеспечения всех типов услуг, в особенности URLLC [2; 6]. Использование диапазонов частот свыше 30 ГГц на сегодняшний день не является целесообразным из-за необходимости использования очень малых сот, высокой стоимости внедрения и ряда других причин [7].

Согласно проведенному анализу, логичным будет рекомендовать к использованию в зоне 1 (рис. 2) частот 4800–4990 МГц, а в зоне 2 – 27,5–29,5 ГГц соответственно. Для каждой из указанных зон территории поселка необходимо выбрать соответствующее оборудование базовых станций.

В качестве антенно-радиомодульных устройств целесообразно использовать устройства Huawei AAU5313 NP для диапазона 4800–4990 МГц и Huawei NAAU5112 NR для диапазона 27,5–29,5 ГГц. Антенны данных моделей характеризуются хорошими массогабаритными характеристиками; имеют ширину диаграммы направленности $\sim 60^\circ$, что дает возможность построить шестисекторную базовую станцию без «темных зон» [5] уверенного радиоприема.

Далее определим уровень уверенного радиоприема, для чего, в первую очередь, выберем модель распространения радиосигнала. На качество принимаемого сигнала, как известно, влияют рельеф местности, плотность городской застройки, растительность и другие факторы [8].



Рис. 2. Зонирование исследуемой местности

Модель для всех местоположений представлена в виде уравнения

$$PL(d, f) = 10\alpha \lg d + \beta + 10\gamma \lg f + N(0, \sigma) \text{дБ},$$

где d – прямое расстояние между передающей и приемной станциями в трехмерной системе координат (м); f – рабочая частота (ГГц); α – коэффициент, связанный с увеличением потерь на трассе с расстоянием; β – коэффициент, связанный со значением смещения потерь на трассе; γ – коэффициент, связанный с увеличением потерь на трассе с частотой; $N(0, \sigma)$ – нулевая средняя гауссова случайная величина со стандартным отклонением σ (дБ).

Потери при распространении сигнала в свободном пространстве:

$$L_{bf} = 32,4 + 20 \lg(d / 1000) + 20 \lg f = 106,2 + 20 \lg(d / 1000).$$

В случае NLoS (*non line of sight*) [8] сигналы могут достигать станции с помощью механизмов дифракции или многолучевого распространения, которые могут представлять собой комбинацию механизмов дифракции и отражения.

В случае распространения в зоне 1 (городская застройка) модель пригодна для следующих параметров: $h_1 = 4 - 50$ м; $h_2 = 1 - 3$ м; $f = 800 - 5000$ МГц; $d = 20 - 1000$ м, где h_1 – высота базовой станции, h_2 – высота абонентского терминала.



На рисунке 3 представлен график зависимости потерь (затухания) сигнала от расстояния, на котором показаны кривая потерь по модели распространения NLoS для городской зоны (L_{nlos}), кривые максимально допустимых потерь для восходящего (L_{ul}) и нисходящего потока (L_{dl}). Таким образом, можно определить дальность связи по этим каналам в точках пересечения кривой модели и кривой МДП.

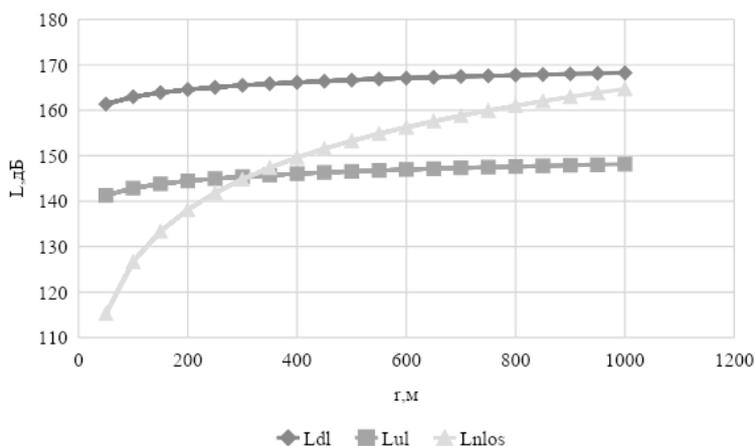


Рис. 3. График зависимости потерь (затухания) сигнала от расстояния

На основе графика можно заключить, что максимально допустимые потери для восходящей линии меньше, чем для нисходящей. Следовательно, восходящая линия будет ограничивающей по дальности связи. Максимальной дальностью связи является точка пересечения L_{ul} и L_{nlos} . В наземной радиосвязи линия вверх (UL) всегда энергетически слабее, чем линия вниз (DL), из-за разницы максимальной мощности передатчиков станций. Следовательно, максимальная дальность связи по графику для зоны 1 составит $R = 300$ м.

Проанализируем условия радиопокрытия для диапазона частот 28 ГГц (зона 2). На характеристики принимаемого сигнала в данном случае влияют три фактора: мелкомасштабное многолучевое замирание (a), крупномасштабное затухание (b) и потери на пути распространения (c) [8; 9]. Необходимые расчетные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные параметры для разных типов местности

Параметр	Город (А)	Пригород (В)	Сельская местность (С)
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

Примечание: в проектируемой зоне 2 преобладают трехэтажные постройки, поэтому для расчетов выбрана местность В. Высота антенны БС $h_{tx} = 17$ м, высота АС $h_{rx} = 1,5$ м. Частота 28 ГГц, поправка на эффект затухания 6 дБ, средний поправочный коэффициент наклона $\alpha = 3,2$.



При использовании адаптивной антенной системы следует понимать, что различные значения ширины луча могут быть реализованы путем объединения большего или меньшего числа элементов антенной решетки в массиве. Чем меньше ширина луча диаграммы направленности, тем выше должны быть коэффициент усиления и излучаемая мощность, что приводит к двум граничным условиям для расчета канала связи.

Мощность принимаемого сигнала зависит от расстояния между передатчиком и приемником. Для того чтобы рассчитать запас на замирания, необходимо вычесть из полученной мощности чувствительность приемника. Аналогичным образом производится расчет уровня мощности на входе приемника и запаса на замирания для остальных случаев.

Вычисление уровня мощности приемника и запаса на замирания для линии вверх при излучении узкого луча выполним по формулам

$$P_r = -42,16 - 43,12 \lg d - 0,69d,$$

$$M_{UL} = 55,84 - 43,12 \lg d - 0,69d.$$

Исходя из этого построим графики зависимости M_{DL} и M_{UL} для случая использования широкого и узкого луча от d для линий вверх и вниз (рис. 4).

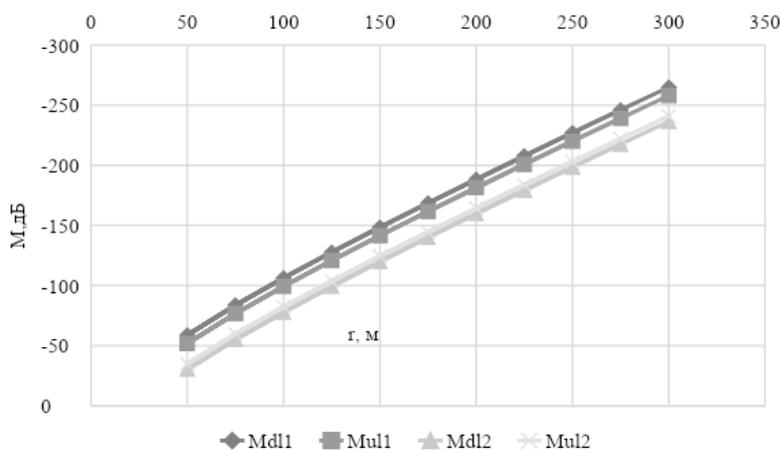


Рис. 4. График зависимости запаса на замирания от расстояния между передатчиком и приемником

По представленному графику можно сделать вывод о том, что максимальная дальность связи составит 150 м, следовательно, расстояние между двумя приемо-передающими модулями должно быть не более 300 м.

Все полученные значения не превышают максимально допустимую дальность связи, исходя из расчета зон радиопокрытия (табл. 2). Радиус соты будет минимальным значением дальности связи для каждой из зон.



Таблица 2

Определение радиуса соты

Зона	Дальность связи по графику, км	Дальность связи по трафику, км	Количество базовых станций
1	0,3	0,47	22
2	0,15	0,59	10

Следующим этапом является расстановка базовых станций пятого поколения gNB на рассматриваемой территории. При частотно-территориальном планировании необходимо обеспечить максимальную зону покрытия, учитывая при этом такие особенности, как рельеф местности, концентрацию абонентов и др. Общее количество базовых станций составляет 32 (табл. 2). Поскольку для каждой зоны выбраны разные частоты, то радиус действия, высота и количество базовых станций для каждой зоны различны. БС будут расположены как на зданиях, так и на опорах двойного назначения. Рекомендуемое расположение БС представлено на рисунке 5.

73

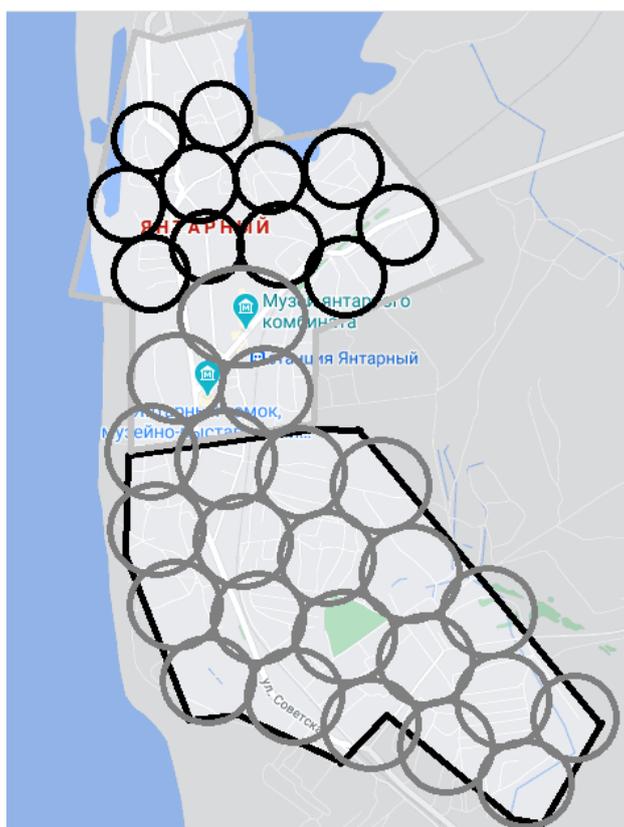


Рис. 5. План размещения БС на территории поселка



Некоторые БС находятся на местах ныне существующих, что сократит расходы при создании сети 5G за счет переиспользования частот с применением Massive MIMO [9] и использования различных методов модуляции.

Проведенные расчеты пропускной способности сети для двух проектируемых зон позволили рассчитать необходимое количество базовых станций, выполнить анализ зон уверенного радиоприема как по трафику, так и по энергетическому бюджету сети, обосновать оптимальное расположение БС gnB.

Таким образом, в работе решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих на сегодняшний день систем сотовой связи в поселке Янтарный, реализуемых с помощью семи базовых станций, которые обеспечивают покрытие территории сетями второго, третьего и четвертого поколений. При этом обнаружено, что в ряде районов неуверенно функционирует или отсутствует мобильный интернет и другие важные сервисы.

2. Исходя из плотности застройки, высоты зданий и количества потенциальных абонентов было выполнено зонирование территории. Для первой зоны с характерной высотой зданий ~ 20 м выбран частотный диапазон 4800–4990 МГц; для второй зоны – диапазон миллиметровых волн 28 ГГц (в этом районе высота зданий составляет ~ 15 м).

3. Для каждой из зон выбрано оборудование компании Huawei с соответствующим частотным диапазоном.

4. Выявлена пропускная способность (зона 1 – 198 000 Мбит/с, зона 2 – 120 000 Мбит/с), рассчитано необходимое количество БС (зона 1 – 22, зона 2 – 10).

5. Определены зоны уверенного радиоприема, которые исходя из трафика составили 466 м (зона 1) и 592 м (зона 2), исходя из энергетического бюджета сети – 300 м (зона 1) и 150 м (зона 2). Из полученных показателей выбраны наименьшие.

6. Выполнено примерное планирование расположения БС на местности.

Реализация предложенных рекомендаций позволит обеспечить поселок Янтарный надежной сотовой связью пятого поколения, обеспечивающей все существующие и перспективные потребности динамично развивающейся курортной зоны.

Список литературы

1. Гимадинов Р. Ф. Кластеризация в мобильных сетях 5G. Случай частичной мобильности // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. Т. 3, №2. С. 44–52.

2. Аминева А. В., Блохин А. В. Измерения в телекоммуникационных системах. Екатеринбург, 2015.

3. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Юрчук А. Б. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура. М., 2010.

4. Тихвинский В. О. Сети 5G и IoT – инновационная среда для цифровой экономики России // Электросвязь. 2017. №8. С. 18–24.



5. *Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации* : приказ №923 от 27.12.2019 г. Минкомсвязи России. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

6. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Коваль В. А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. М., 2019.

7. 5G: NR; Radio Resource Control (RRC) : Protocol Specification (3GPP TS 38.331. 15.3.0 Release 15). ETSI, 2018. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138331/15.03.00_60/ts_138331v150300p.pdf (дата обращения: 30.03.2021).

8. Teral S. 5G best choice architecture. IHS Markit. White Paper. 30 Jan. 2019. URL: https://res-www.zte.com.cn/mediares/zte/Files/PDF/white_book/5g-best-choice-architecture.pdf (дата обращения: 30.03.2021).

9. *Расчет ослабления в свободном пространстве* : рекомендация МСЭ-R P.525-3. Сер. P: Распространение радиоволн. 2016. [Вып.] 11. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-S!!PDF-R.pdf (дата обращения: 30.03.2021).

Об авторах

Мария Германовна Филатова — студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: MGFilatova@stud.kantiana.ru

Виктория Александровна Алецкая — студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VAletsкая@stud.kantiana.ru

Светлана Геннадьевна Шpileвая — канд. пед. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SSHpilevaya@kantiana.ru

The authors

Maria G. Filatova, Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: MGFilatova@stud.kantiana.ru

Victoria A. Aletsкая, Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VAletsкая@stud.kantiana.ru

Dr Svetlana G. Shpilevaya, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SSHpilevaya@kantiana.ru

† S. B. Leble, A. V. Yurov

**INITIAL PROBLEM FOR HEAT EQUATION
WITH MULTISOLITON INHOMOGENEITY
AND ONE-LOOP QUANTUM CORRECTIONS¹**

Поступила в редакцию 03.09.2021 г.

Рецензия от 23.09.2021 г.

76

The generalized zeta-function is built by a dressing method based on the Darboux covariance of the heat equation and used to evaluate the correspondent functional integral in quasiclassical approximation. Quantum corrections to a kink-like solutions of Landau – Ginzburg model are calculated.

Используя одевающий метод, основанный на ковариантности относительно преобразований Дарбу уравнения теплопроводности, мы вычисляем дзета-функцию для дальнейшей оценки функционального интеграла в квазиклассическом приближении. Вычислена квантовая поправка к решению типа «кинк» модели Ландау – Гинзбурга.

Keywords: Darboux transformation, heat conduction equation, kink, functional integral

Ключевые слова: преобразование Дарбу, уравнение теплопроводности, кинк, функциональный интеграл

1. Introduction

In the papers [1–4] quantum corrections to a few classical solutions by means of Riemann zeta-function are calculated. Most interesting of them are the corrections to the kink – the separatrix solution of field ϕ^4 model. The method of [1–3] is rather complicated and it could be useful to simplify it. We use the dressing technique based on classical Darboux transformations (DT) with a new applications to Green function construction [4]. It is the main aim of this note with eventual possibility to generalize the result due to universality of the technique when a link to integrable (soliton, SUSY) systems is established [5]. The suggested approach open new possibilities; for example it allows to show the way to calculate the quantum corrections to Q-balls [6] and periodic solutions of the models. The last problem is posed in the useful review [7].

¹ Это наша последняя совместная работа с безвременно ушедшим профессором С.Б. Лебле. В свое время мы выложили ее в ArXiv и планировали отправить в один из реферируемых журналов. К сожалению, потом мы занялись более «срочными» делами, и работа так и осталась в ArXiv дожидаться своего часа. В память о своем ушедшем старшем товарище я публикую эту статью в «Вестнике» без каких-либо изменений (А.В. Юров).



2. Heat equation Cauchy problem

We will base on the DT-covariance of the heat equation for the function $\rho(\tau, x, y)$:

$$-\rho_\tau + \rho_{xx} + u(x)\rho = 0, \quad (1)$$

that means the form-invariance of (1) with respect to iterated DT, defined by the Wronskian $W[\phi_1, \dots, \phi_N]$ of the solutions of (1):

$$\begin{aligned} \rho &\rightarrow \rho[N] = \frac{W[\phi_1, \dots, \phi_N, \rho]}{W[\phi_1, \dots, \phi_N]}, \\ u &\rightarrow u[N] = u + 2\ln_{xx} W[\phi_1, \dots, \phi_N]. \end{aligned} \quad (2)$$

77

Consider now a Cauchy problem for the equation (1), where $u(x)$ represents the reflectionless potential in a sense that it could be produced by the DT and the initial condition is

$$\rho(0, x, y) = \delta(x - y). \quad (3)$$

The problem is formulated for a Green function: it is rather general and may be applied as a model of classical diffusion or heat conductivity. We, however, would follow other applications in the theory of quasiclassical quantization, where the function ρ is treated as density matrix whence τ stands for inverse temperature.

The algorithm of such problem solution is the dressing procedure organized by a sequence of DTs defined by (2):

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial x} - \ln_x \phi_1(x, y)\right) \rho_0(0, x, y) &= g_1(x, y), \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} - \ln_x \phi_2[1](x, y)\right) g_1(x, y) &= g_2(x, y), \dots, \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} - \ln_x \phi_k[k-1](x, y)\right) g_{k-1} &= g_k(x, y), \\ g_N(x, y) &= \delta(x, y), 2 \leq k \leq N \end{aligned} \quad (4)$$

and the following theorem.

Theorem. The function $\rho[N]$ being built by (2) will be a solution of the problem (1, 3) with the potential $u[N]$, if $\rho(\tau, x, y)$ is a solution of the (1) with the initial condition $\rho_0(0, x, y)$.

The result is used when static solutions of ϕ^4 model are quantized by means of Riemann function $\zeta(s)$ [1–3] expressed via the Green functions of the (1) (see also [4]). The one-loop quantum correction to action is evaluated directly as

$$S_q = -\zeta'(0).$$



3. Example of kink

Most popular example of the kink is obtained in this scheme by means of DT over zero seed $u=0$. The solution ρ of (1) with ρ_0 as initial condition for this case is a simple heat equation solution

$$\rho(\tau, x, y) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\tau}} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_0(z, y) \exp[-(x-z)^2 / 4\tau] dz. \quad (5)$$

The initial condition ρ_0 is evaluated by direct integration in (4):

$$\rho_0(x, y) = \phi_1(x) \begin{cases} \phi_1^{-1}(y), & x > y \\ 0, & x < y \end{cases}. \quad (6)$$

The Green function $\rho[2]$ (density matrix) for the kink solution as the potential is built by the two-fold DT by the Wronskian formula (2) that results in

$$\rho[2](\tau, x, y) = \exp\left[-\frac{(x-y)^2}{4\tau}\right] / 2\sqrt{\pi\tau} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \rho_m \psi_m(x) \psi_m(y) \left[\text{Erf}\left[\frac{(x-y+2b_m\tau)}{2\sqrt{\tau}}\right] - \text{Erf}\left[\frac{(x-y-2b_m\tau)}{2\sqrt{\tau}}\right] \right], \quad (7)$$

where $b_k = km / \sqrt{2}$, $\rho_k = |\psi|^{-2}$, $k=1, 2$. After multiplication of the Green function by $\exp[-4m^2\tau]$:

$$\rho \rightarrow \rho \exp[-4m^2\tau],$$

the first term of the Green function leads to a divergent integral. This divergence is well-known, its origin is a zero vacuum oscillations. In our approach this fact has transparent explanation, because the divergent term is simply a solution of heat equation with constant coefficients, that appear when the self-action of scalar field is neglected. Such divergence is usually compensated by addition of contra terms of normal order.

Our procedure deletes all ultraviolet divergencies of 1+1 ϕ^4 model including energy of zero oscillations and one-meson states if one evaluates the generalized zeta-function by the formula

$$\zeta_D(s) = M^{2s} \frac{\int_0^{\infty} \gamma(t) t^{s-1} dt}{\Gamma(s)}. \quad (8)$$

$\Gamma(s)$ is the Euler gamma function and M is a mass scale. The function $\gamma(t)$ in the integrand of (8) is expressed via the Green functions $G(x, y, \tau)$ and $G_0(x, y, \tau)$ difference. The result coincides with one from [1–3].

4. Conclusion

As a conclusion let us note that this approach is elaborated in [8] (published in a local conference abstract book) and allows to calculate one-loop corrections to the N-level reflectionless potential and, very similarly, solitons of SG. Some eventual applications are visible in the case studied at [8].



References

1. *Konoplich R. V.* Quantum corrections calculations to nontrivial classical solutions via zeta-function // *TMP*. 1987. Vol. 73. P. 379–392.
2. *Konoplich R. V.* The zeta-function method in field theory at finite temperature // *Teoret. Mat. Fiz.* 1989. Vol. 78, №3. P. 444–457.
3. *Konoplich R. V.* One-loop quantum corrections to the energy of extended objects // *Nuclear Phys. B*. 1989. Vol. 323, №3. P. 660–672.
4. *Leble S., Zaitsev A.* The Modified Resolvent for the One-dimensional Schrodinger Operator with a reflectionless potential and Green Functions in Multidimensions // *J. Phys. A: Math. Gen.* 1995. Vol. 28. P. 585–588.
5. *Sukumar C. V.* Green's functions, sum rules and matrix elements for SUSY partners // *J. Phys. A* 37. 2004. №43. P. 10287–10295.
6. *Cervero J. M., Estevez P. G.* Exact two-dimensional Q-balls near the kink phase // *Phys. Lett. B*. 1986. Vol. 176. P. 139–142.
7. *Tuszyński J. A., Dixon J. M., Grundland A. M.* Nonlinear Field Theories and Non-Gaussian Fluctuations for Near-Critical Many-Body Systems // *Fortschr. Phys.* 1994. Vol. 42, №4. P. 301–337.
8. *Leble S. B., Yurov A. V.* On the quantum corrections to classical solutions via generalized zeta-function // *Abstracts of XXVII sci. conf. Kaliningrad State University. Kaliningrad, 1993.* P. 157.
9. *Novikov S. P., Manakov S. V., Pitaevskii L. P., Zakharov V. E.* Theory of Solitons // *The inverse scattering method. Contemp. Soviet Math. N. Y., 1984.*
10. *Tuszyński J. A., Middleton J., Christiansen P. L., Dixon J. M.* Exact eigenfunctions of the linear ramp potential in the Gross-Pitaevskii equation for the Bose – Einstein condensate // *Phys. Lett. A* 291. 2001. №4-5. P. 220–225.

The authors

Prof. Sergey B. Leble, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: lebleu@mail.ru

Prof. Artyom V. Yurov, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.
E-mail: AIUrov@kantiana.ru

Об авторах

Сергей Борисович Лебле – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: lebleu@mail.ru

Артем Валерианович Юров – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.
E-mail: AIUrov@kantiana.ru

В. А. Юров, А. А. Юрова

МИРЫ «ФЕНИКСЫ»

Поступила в редакцию 27.08.2021 г.

Рецензия от 14.09.2021 г.

80

Обсуждается проблема бальцмановских наблюдателей. Показано, что предложенный Пейджем способ решения этой проблемы приводит к тому, что вселенная, в которой существуют упорядоченные наблюдатели, существует не более секунды, после чего разрушается пузырьер новой фазы. Оценивается масса сверхтяжелого гравитино, которая оказывается на один порядок больше по сравнению с оценкой Пейджа.

The problem of Boltzmann observers is discussed. It is shown that Page's proposed way of solving the problem includes this universe, which exists ordered observers, exists for no more than a second, after which it is destroyed by a bubble of a new phase. The mass of the superheavy gravitino is estimated to be one more than Page's estimate.

Ключевые слова: бальцмановский мозг, фазовые переходы, космологическая постоянная, масса гравитино

Keywords: Boltzmann brain, phase transitions, cosmological constant, gravitino mass

В 2006 г. Дон Пейдж впервые сформулировал проблему, получившую название проблемы «бальцмановских наблюдателей». Суть ее заключалась в следующем. Согласно принципам квантовой механики, всякий процесс измерения какой бы то ни было физической величины описывается унитарным квантовомеханическим оператором, причем этот оператор может применяться к произвольным волновым функциям. Частным случаем измерения является процесс осознания обычным наблюдателем (Ordered Observer, OO) окружающей его физической реальности (в том числе в процессе чтения данной статьи). Следовательно, существует некоторый унитарный оператор, который, действуя на волновую функцию наблюдателя, описывает процесс осознания этим наблюдателем окружающей его реальности. Но этот же оператор с тем же успехом можно применить и к другим волновым функциям, в том числе там, где вроде бы нет наблюдателя. С практической точки зрения это означает, что в произвольно выбранном объеме возможно спонтанное возникновение «идентичного натуральному» наблюдателя в виде квантовой флуктуации, существующей ровно столько, сколько необходимо для того, чтобы совершить единственный акт осознания (в нашем случае — для прочтения данной фразы). Таких «виртуальных» наблюдателей Пейдж назвал бальцмановскими наблюдателями (Boltzmann Brains, BB), после чего показал, что в тех Вселенных типа де Сит-



тера (dS), которые просуществуют как минимум 10^{60} лет, доминирующим типом наблюдателей станут именно ВВ. Однако теория струн предсказывает, что вселенные типа dS могут существовать значительно дольше — порядка $e^{0.5 \times 10^{123}}$ лет. Следовательно, нам приходится заключить, что произвольно взятый наблюдатель в dS-вселенной должен быть ВВ, даже если он об этом не подозревает.

Естественно, такое заключение вызвало активную критику среди космологов. Было предложено множество подходов, призванных решить парадокс ВВ, в том числе при помощи специального выбора космологической меры [2–4] и путем допущения существования фантомной компоненты [5]. Сам же Пейдж в [6] предложил собственную, весьма любопытную гипотезу, согласно которой проблема ВВ в dS решается вследствие спонтанного возникновения в dS «пузырей-убийц» — областей истинного вакуума. Рассмотрим плоскую изотропную и однородную вселенную с линейным элементом

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t)(dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)). \quad (1)$$

Идея Пейджа состоит в том, что во вселенной возникает движущийся со скоростью света пузырь новой фазы, причем вероятность того, что вселенная не будет разрушена, определяется приближенным соотношением

$$P \sim e^{-AV_4},$$

где

$$V_4 \sim c \int dt a^3(t).$$

Более точные формулы приводят, в частности, к неберущимся интегралам, при этом приводя практически к тем же численным оценкам. По этой причине в данной работе мы ограничимся вышеприведенными соотношениями.

Условие Пейджа имеет вид

$$\int d^4x P \sqrt{-g} < \infty. \quad (2)$$

Суть его в том, что пузырь новой фазы ограничивает экспоненциальный (в случае dS-моделей) рост масштабного фактора, приводя эффективно к конечному четырехмерному объему вселенной (точнее, рассматриваемого домена в мультиверсе). Если этого не сделать, то вселенная будет неограниченно расширяться и четырехмерный объем будет неограниченно расти. Как показано в [1], если логарифм этой величины превысит 10^{50} , то в таком домене будут доминировать ВВ, а не ОО.

В dS-вселенной параметр Хаббла

$$H_\Lambda = \text{const}, \quad a(t) = a_0 e^{H_\Lambda t},$$



причем

$$H_{\Lambda} = \sqrt{\frac{8\pi G\Lambda}{3}},$$

где Λ имеет естественную размерность плотности массы. Используя (1) и (2), имеем

$$A > \frac{9H_{\Lambda}^2 t}{ca_0^3} e^{-3H_{\Lambda} t}. \quad (3)$$

Правая часть выражения (3) имеет максимум при $t = (3H_{\Lambda})^{-1}$, откуда получаем оценку

$$A > A_{min} = \frac{3H_{\Lambda}^4}{ec^4}, \quad (4)$$

где положено $c = H_{\Lambda} a_0$.

Для получения численных оценок воспользуемся данными, собранными в рамках проектов Hubble Space Telescope Key Project [7]:

$$H_{\Lambda} = \sqrt{\Omega_{\Lambda}} H_0, \quad H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc},$$

и WMAP [8; 9]

$$\Omega_{\Lambda} = 0.72 \pm 0.04.$$

Здесь Ω_{Λ} — отношение плотности массы (то есть энергии, деленной на c^2) Λ -члена к критической плотности, а H_0 — современное значение параметра Хаббла. В дальнейшем будем использовать популярные значения $H_0 = 64$ км/с/Мпс, $\Omega_{\Lambda} = 0.74$ (такие оценки принимает в своих последних работах Линде). В результате получаем

$$A_{min} = (0.164 \times 10^{29} \text{ см})^{-4} = (20 \text{ Глет})^{-4} = e^{-564}. \quad (5)$$

Здесь переход от сантиметров к гигагодам (миллиардам лет) осуществлен в рамках СТО: 1 см соответствует примерно 0.3×10^{-10} с, а последнее выражение записано в планковских единицах.

Таким образом, получаем, что среднее время жизни вселенной (домена), разваливаемой пузырьком новой фазы, составляет около 20 Глет (20×10^9 лет).

Однако Пейдж не учел факта существования мультиверса, в котором реализуются различные значения Λ . Величина Λ в мультиверсе является суммой двух слагаемых: (отрицательного) хиггсовского конденсата $\langle \Phi \rangle$ и случайной переменной χ , зависящей от набора полей материи, в простейшем случае — от одного скалярного поля ϕ :

$$\Lambda = \langle \Phi \rangle + \chi(\phi). \quad (6)$$



Именно используя представления о наблюдаемой космологической постоянной как об эффективной (6), Гаррига и Виленкин показали, что Λ должна быть мала и с вероятностью около 10–20% совпадать с наблюдаемой [10; 11]. Эта эпохальная работа фактически стала первым решением проблемы малости космологической постоянной и в то же время указанием на необходимость существования мультиверса¹.

Для дальнейшего существенно, что величина скорости распада A и эффективная величина космологической постоянной Λ являются независимыми друг от друга. Следуя Пейджу, будем считать, что A определяется механизмом квантового туннелирования, предложенным в [13], согласно которому можно написать выражение

$$A \sim \exp \left[-\frac{\pi(C-1)^2}{4m_{3/2}^2 C^2 (C-1/2)^2} \right], \quad (7)$$

где $m_{3/2}$ – масса гравитино, $C^2 > 1$ – отношение глубин двух суперсимметричных AdS-вакуумов, а также принята система единиц, в которой $\hbar = c = 8\pi G = 1$.

Как видно из (7), величина A не зависит от $\chi(\phi)$ (хотя может зависеть от $\langle \Phi \rangle$ через массу гравитино), поэтому значения эффективной космологической постоянной и скорости туннелирования могут рассматриваться как две независимые переменные.

Теперь рассмотрим области мультиверса, в которых не происходит эффективной компенсации величин $\langle \Phi \rangle$ и $\chi(\phi)$ (таких областей большинство). В областях, в которых Λ велика и отрицательна, происходит быстрый коллапс, предотвращающий преобладание ВВ над ОО, поэтому сконцентрируемся на доменах с положительной и большой по модулю эффективной космологической постоянной (6) – именно они представляют основную опасность с точки зрения возможного преобладания ВВ.

Заметим, что существование ВВ накладывает верхнюю границу на Λ . Это следует из ограничения Бекенштейна, согласно которому максимальное число квантовых состояний в области с пространственным размером R ограничено неравенством:

$$N \leq \frac{\pi R^2}{L_p^2 \ln 2},$$

где $L_p^2 \sim 10^{-33}$ см – планковский масштаб. В dS-вселенной в качестве R можно взять горизонт событий будущего

$$R = a(t) \int_t^{+\infty} \frac{dt'}{a(t')} = \frac{c}{H_\Lambda},$$

¹ Недавно о неизбежности введения мультиверса писал Рубаков в [12]. Он пояснил, что если запуск LHC не позволит найти бозон Хиггса и легчайшую суперсимметричную частицу, то придется признать существование мультиверса. Ему это не очень нравится, но другого выхода, как он пишет, по-видимому, не будет.



поэтому возникновение ВВ, требующих не менее N бит, заведомо невозможно в доменах с

$$\Lambda > \Lambda_m = \frac{3c^2}{8\pi GN \ln(2)L_p^2},$$

или с

$$H_\Lambda^2 > H_m^2 = \frac{\pi c^2}{N \ln(2)L_p^2}. \quad (8)$$

84

По оценке Моравека, для одного акта осознания требуется от 10^{14} до 10^{17} бит. Выбирая верхнюю границу, подставляем в (8) и (4). В результате находим величину A_m , которая необходима для отсутствия ВВ вплоть до предельных значений Λ_m :

$$A_m = \frac{3\pi^2}{eN^2 \ln^2 2 L_p^2} = (0.44 \times 10^{-35} \text{ s})^{-4} = e^{-75}, \quad (9)$$

где последнее значение приведено в планковских единицах.

Сравнивая с (5), видим, что среднее время полураспада вселенной за счет квантового туннелирования будет составлять всего 10^{-35} с. Таким образом, мы не являемся ВВ, только если домены существуют 10^{-35} с, после чего уничтожаются пузырями новой фазы. Этот результат доказывает утверждение, сделанное в абстракте.

В заключение оценим массу гравитино. Считая $C \gg 1$ и вводя перенормированную массу $\mu_{3/2}$ (масса $m_{3/2}$ из (7) неперенормирована), находим из (7)

$$\frac{\pi}{4\mu_{3/2}^2} = -\ln A,$$

откуда в планковских единицах

$$\mu_{3/2} \sim 0.1 \sim 10^{18} \text{ GeV},$$

что на один порядок больше числа, полученного Пейджем:

$$\mu_{3/2} \sim 0.038 \sim 10^{17} \text{ GeV}.$$

Следовательно, гравитино должно быть в десять раз тяжелее, чем предсказано в [6].

Список литературы

1. Page D.N. The Lifetime of the Universe // J. Korean Phys. Soc. 2006. Vol. 49. P. 711–714. arXiv:hep-th/0510003v1.
2. Linde A. Sinks in the landscape, Boltzmann brains and the cosmological constant problem // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2007. №1. arXiv:hep-th/0611043.



3. *Vilenkin A.* Freak observers and the measure of the multiverse // *Journal of High Energy Physics*. 2007. №1. arXiv:hep-th/0611271.
4. *Bousso R., Freivogel B.* A paradox in the global description of the multiverse // *Journal of High Energy Physics*. 2007. №6. arXiv:hep-th/0610132.
5. *Astaschenok A.V., Yurov A.V., Yurov V.A.* The possible resolution of Boltzmann brains problem in phantom cosmology // *Gravitation and Cosmology*. 2006. Vol. 22, iss. 2. P. 212–219.
6. *Page D.N.* Is Our Universe Likely to Decay within 20 Billion Years? // *Phys. Rev. D*. 2008. Vol. 78, iss. 6. arXiv:hep-th/0610079.
7. *Freedman W.L., Madore B.F., Gibson B.K. et al.* Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant // *Astrophys. J.* 2001. Vol. 553. P. 47–72. arXiv:astro-ph/0012376.
8. *Spergel D.N., Verde L., Peiris H.V. et al.* First-Year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* Observations: Determination of Cosmological Parameters // *Astrophys. J. Suppl.* 2003. Vol. 148. P. 175–194. arXiv:astro-ph/0302209.
9. *Spergel D.N., Bean R., Doré O. et al.* Three-Year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* Observations: Implications for Cosmology // *Astrophys. J. Suppl.* Vol. 170. P. 377–408. arXiv:astro-ph/0603449.
10. *Garriga J., Vilenkin A.* Solutions to the cosmological constant problems // *Phys. Rev. D*. 2001. Vol. 64. arXiv:hep-th/0011262v3.
11. *Vilenkin A.* Cosmological constant problems and their solutions // *The Dark Universe: Matter, Energy, and Gravity* / ed. by M. Livio. Cambridge, 2004. arXiv:hep-th/0106083.
12. *Рубаков В.А.* Иерархии фундаментальных констант (к пунктам 16, 17 и 27 из списка В.Л. Гинзбурга) // *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177, №4. С. 407–414.
13. *Ceresole A., Dall'Agata G., Giriyavets A. et al.* Domain walls, near-BPS bubbles, and probabilities in the landscape // *Phys. Rev. D*. 2006. Vol. 74. arXiv:hep-th/0605266.

Об авторах

Валериан Артемович Юров – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: vayt37@gmail.ru

Алла Александровна Юрова – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Калининградский государственный технический университет, Россия.

E-mail: AIUrova@kantiana.ru

The authors

Dr Valerian A. Yurov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: vayt37@gmail.ru

Dr Alla A. Yurova, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, State Technical University, Russia.

E-mail: AIUrova@kantiana.ru

С. В. Молчанов, С. Н. Чижма, М. Д. Холмогорова

**ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
БЕСПРОВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ**

Поступила в редакцию 02.06.2021 г.

Рецензия от 21.06.2021 г.

86

Рассмотрена возможность применения адаптивных алгоритмов управления в беспроводных оптических системах для повышения их производительности. Предложено применение обратной связи для создания динамической адаптивной системы, использующей подстройку уровня передаваемой мощности, изменение типа модуляции и скорости кодирования для преодоления атмосферного затухания. Проведено моделирование и анализ параметров оптической системы на различных дистанциях со скоростью передачи данных 1 Гбит/с с учетом особенностей распространения оптического сигнала в свободном пространстве. Производительность предлагаемой беспроводной оптической системы связи с динамическим управлением оценивается при показателе качества BER не более 10^{-8} .

The possibility of using adaptive control algorithms in wireless optical systems to improve their performance is considered. The use of feedback is proposed to create a dynamic system using the adjustment of the transmitted power level, changing the type of modulation and coding rate for atmospheric attenuation. Modeling and analysis of the system parameters at various distances with a data transmission rate of 1 Gbit / s, taking into account the propagation of an optical signal in free space, have been carried out. The performance of the proposed wireless optical communication system with dynamic control is estimated at quality indicator BER no more than 10^{-8} .

Ключевые слова: атмосферная оптическая линия связи (АОЛС), адаптивные системы, гибридные оптические системы, адаптивная атмосферная оптическая линия связи (ААОЛС)

Keywords: free-space optical communication line (FSO), adaptive optic systems, hybrid optical systems, adaptive free-space optical communication line (AFSO)

В настоящее время в России в рамках реализации национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» существует потребность в увеличении пропускных способностей в беспроводных системах связи для устранения проблемы цифрового неравенства. Достичь требуемых скоростей передачи с помощью радиочастотной связи можно в миллиметровом диапазоне длин волн, но использование таких систем ограничивается высокой стоимостью оборудования и малым радиусом покрытия. В таких случаях адаптивные оптические линии связи (ААОЛС) становятся более привлекательной альтернативой радиочастотной технологии связи с точки зрения скорости передачи, стоимости, дальности связи при построении фиксированных систем



связи. В то же время беспроводные оптические системы связи обладают высокими уровнями затухания в свободном пространстве и сильной зависимостью от погодных условий, что в результате ограничивает широкое применение АОЛС [1].

Целью данной работы является исследование возможности применения комбинации методов повышения производительности беспроводных оптических систем передачи информации, осуществляющих адаптивное управление: изменение передаваемой мощности, типа модуляции и кодирования. Предлагаемая оптическая система с динамическим управлением (ОСДУ) позволит решить перечисленные проблемы АОЛС.

Адаптивная система ААОЛС должна реагировать на изменения в канале связи, контролируя уровень и качество принимаемого сигнала, и соответствующим образом подстраивать параметры передающей части [2] для обеспечения нормированных значений качества канала связи. Схема конфигурации системы ОСДУ представлена на рисунке 1. Использование обратной связи в оптическом канале с резервированием с помощью радиоканала (Wi-Fi, LTE) позволяет постоянно отслеживать параметры принимаемого сигнала для оценки затухания в ААОЛС и соответствующим образом подстраивать систему.

87



Рис. 1. Схема построения оптической системы передачи с динамическим управлением

На оптический сигнал при распространении в атмосфере влияют различные факторы, серьезно ухудшая производительность системы ААОЛС, особенно эффект мерцания, подобный эффекту замирания, возникающий в результате случайного изменения показателя преломления вследствие изменения температуры и давления воздуха [3; 8]. Для канала, работающего со скоростью 1 Гбит/с, это может привести к потере до 100 – 120 последовательных битов.

Применение различных методов модуляции

В системах связи АОЛС используются различные методы модуляции, включая двухпозиционную манипуляцию (ООК), двоичную фазовую манипуляцию (BPSK), квадратурную фазовую манипуляцию (QPSK)



и квадратурную амплитудную модуляцию (QAM). Среди них ООК — самый простой и широко используемый метод, но он чрезвычайно чувствителен к атмосферной турбулентности и требует адаптивного порога для оптимизации системы [4]. Методы фазовой модуляции обладают высокой чувствительностью и помехоустойчивостью, что позволяет использовать их для построения системы ААОЛС.

На основе базовой модели атмосферного оптического канала связи, представленной на рисунке 2, проанализирована работа системы ААОЛС с использованием различных методов модуляции. Производительность атмосферной оптической линии связи исследовалась в условиях слабой и сильной турбулентности.

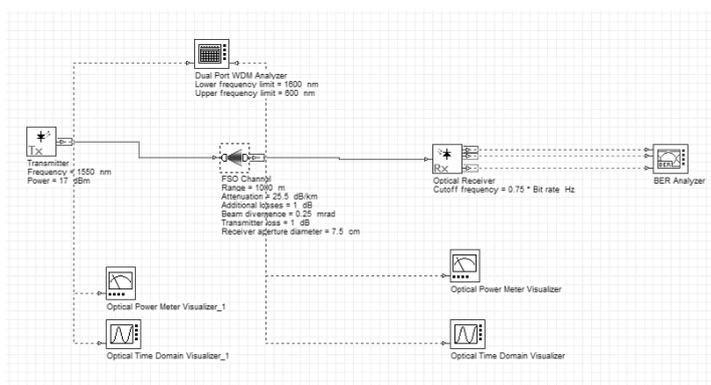


Рис. 2. Схема модели исследуемой системы ААОЛС

Построена модель одноканальной системы АОЛС, работающей в условиях слабой и сильной турбулентности, оценено значение Bit Error Rate (BER) — параметра ошибок по битам при различных методах модуляции и изменении уровней отношения сигнал/шум SNR (Signal-to-noise ratio) в дБ на входе приемника (рис. 3).

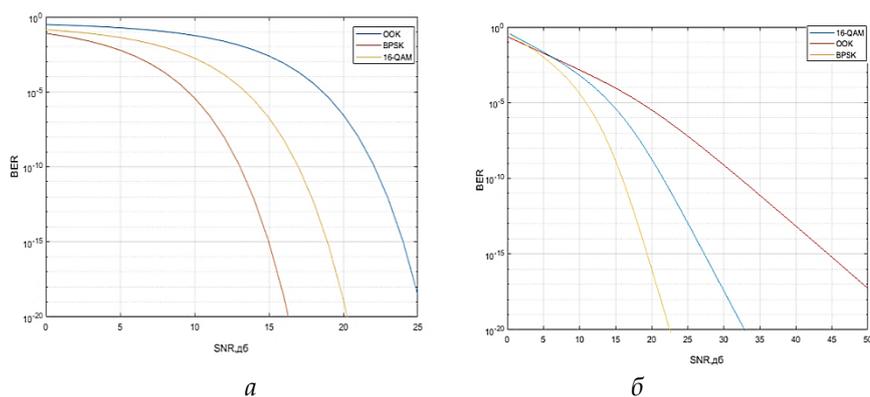


Рис. 3. Показатели коэффициента ошибок по битам (BER) для различных форматов модуляции: а — в канале со слабой турбулентностью; б — в канале с сильной турбулентностью



Для достижения целевого значения BER 10^{-8} модуляция ООК требует отношения сигнал/шум 20 дБ на приемнике, в то время как наблюдаемые требования к отношению сигнал/шум для 16-QAM и BPSK составляют 11 и 8 дБ соответственно. Улучшение производительности BPSK по сравнению с ООК в случае слабой турбулентности равно примерно 60 %. В канале с сильной турбулентностью для достижения BER 10^{-8} требования к отношению сигнал/шум для ООК, BPSK и 16-QAM составляют 45, 19 и 28 дБ соответственно.

Управление передаваемой мощностью

Для определения уровня принятого оптического сигнала необходимо априорное знание уровня излучаемой мощности передатчика и суммарных потерь оптического сигнала в линии связи. Затем уровень принимаемого сигнала сравнивается с уровнем чувствительности приемника и оценивается энергетический запас канала связи [5]. В работе предложено использовать несколько лазеров в конструкции передатчика, которые управляются контроллером с датчиком видимости, что обеспечивает формирование оптимальной мощности передатчика в зависимости от погодных условий. Контроллер обеспечивает вычислительные процедуры формирования функции управления мощностью передатчика сигнала (количество используемых лазеров) в зависимости от данных, полученных с помощью детектора видимости и путем вычисления потерь на затухание сигнала в канале связи.

На рисунке 4 показаны результаты измерения мощности на входе приемника при использовании нескольких фотодетекторов, работающих одновременно с несколькими лазерными источниками при дискретном подключении дополнительных лазеров и плавном регулировании мощности передатчика соответственно.

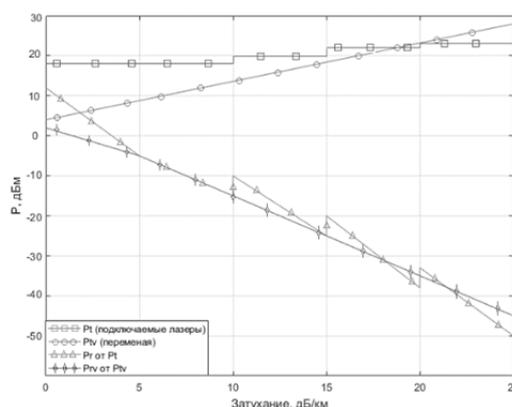


Рис. 4. Зависимость уровня приемной мощности системы ААОЛС при различных значениях затухания среды передачи и мощности передатчика

Скорость передачи данных зависит от уровня сигнала на приеме, а в случае наихудших погодных условий видимость канала уменьшается, потери оптического сигнала при прохождении через атмосферный канал увеличиваются, вызывая уменьшение оптической мощности на



приеме [5]. Значение уровня мощности на приеме обратно пропорционально затуханию сигнала в канале связи и прямо пропорционально мощности передатчика. Таким образом, чем выше принимаемая мощность, тем выше скорость передачи данных и больше энергетический запас канала связи. Влияние среды передачи на оптический сигнал при высоких уровнях затухания приводит к снижению скорости передачи данных, как показано на рисунке 5.

90

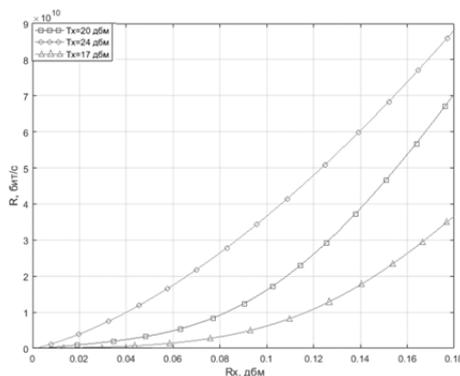


Рис. 5. Скорость передачи данных в зависимости от затухания среды передачи

Адаптивное канальное кодирование

Адаптивное канальное кодирование выполняется с использованием сверточных перфорированных кодов RSPC, которые не уступают наиболее известным сверточным кодам сопоставимой сложности [6].

В соответствии с условиями передачи в канале связи кодовая скорость r будет адаптивно изменяться для достижения минимального энергопотребления, а также удовлетворения требуемой пропускной способности, которая определяется пользователем.

Кривые BER в зависимости от уровня мощности на приеме изображены на рисунке 6. При использовании кодовой скорости $r_i=8/24$ может быть получена минимальная требуемая мощность на приеме [7].

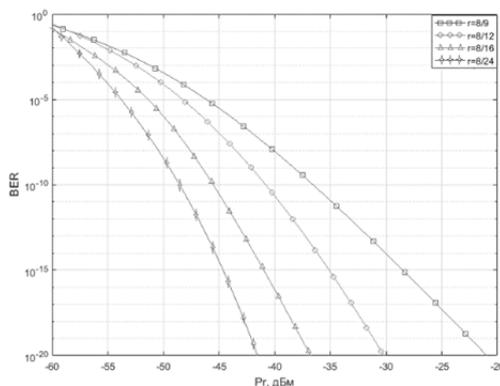


Рис. 6. Зависимость показателей BER кода RSPC от мощности сигнала на приеме



Моделирование оптической системы передачи с динамическим управлением

Адаптивная атмосферная оптическая линия связи представляет собой интеллектуальную систему, которая изменяет параметры передатчика в соответствии с измеренным уровнем затухания в канале связи на приеме. Исследование адаптивного метода управления основано на анализе измеренного уровня входной мощности приемника и вычислении значений показателя BER. Моделирование многоканальной системы ААОЛС позволило оценить коэффициенты рабочих характеристик системы в зависимости от атмосферного затухания и разработать динамическую систему управления для повышения производительности и уровня доступности канала ААОЛС [2].

На основе результатов моделирования построена справочная таблица значений основных характеристик системы передачи ОСДУ для трех видов модуляции (ООК, BPSK и 16-QAM) в условиях затуханий среды передачи, равных 0,1, 2, 15,5 и 25,5 дБ/км, при обеспечении качества принимаемого сигнала не ниже $BER = 10^{-8}$ и скорости передачи 1 Гбит/с на расстоянии 500 м, 1,5 км и 3 км (с. 92).

Проведен анализ полученных результатов, который показал, что для увеличения дальности связи до 3 км необходимо изменить скорость кодирования от 8/9 до 8/24, понизить уровень модуляции до BPSK, увеличить уровень мощности на передаче до 24 дБм.

На рисунке 7 представлена зависимость показателя уровня ошибок BER от дальности связи в условиях сильного тумана для системы без применения адаптивных алгоритмов и с переключением уровня мощности, типа модуляции и скорости кодирования соответственно. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наибольшая дальность связи 3 км с уровнем BER не более 10^{-8} достигается только при использовании адаптивной схемы ААОЛС.

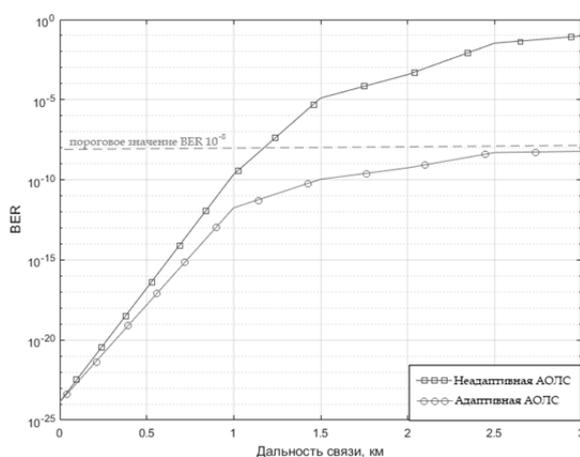


Рис. 7. Зависимость уровня BER от дальности связи

Оптимальные параметры передачи системы ОСДУ при различных значениях атмосферного затухания

Параметр	Дальность связи											
	500 м				1,5 км				3 км			
	0,1	4,2	15,5	25,5	0,1	4,2	15,5	25,5	0,1	4,2	15,5	25,5
Затухание, дБ/км	0,1	4,2	15,5	25,5	0,1	4,2	15,5	25,5	0,1	4,2	15,5	25,5
P_T , дБм	20	20	20	20	20	20	20	22	20	20	24	24
P_R , дБм	18	16	-1,8	-7,8	17	3	-19	-39,5	14	-8,9	-41,4	-71,51
Модуляция	OOK											
Скорость кодирования	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/9	8/16	8/24
BER	$7,42 \cdot 10^{-35}$	$1,07 \cdot 10^{-34}$	$2,25 \cdot 10^{-24}$	$1,50 \cdot 10^{-24}$	$1,24 \cdot 10^{-33}$	$4,47 \cdot 10^{-32}$	$3,01 \cdot 10^{-13}$	$1,08 \cdot 10^{-10}$	$3,97 \cdot 10^{-32}$	$5,87 \cdot 10^{-31}$	$4,32 \cdot 10^{-08}$	$3,00 \cdot 10^{-08}$



Выводы

Представленная оптическая система передачи с динамическим управлением позволяет обеспечить скорость передачи не ниже 1 Гбит/с со значением BER 10^{-8} на дистанциях от 2 до 3 км в условиях густого тумана при значении затухания среды передачи порядка 25 дБ/км. На дистанциях до 2 км достижимы скорости передачи в диапазоне 1–10 Гбит/с с подстройкой параметров передачи при значениях затухания среды передачи более 15 дБ/км, при этом качество принятого сигнала не падает ниже уровня BER 10^{-10} .

Результаты, полученные в ходе исследования, говорят о целесообразности применения адаптивных алгоритмов управления в беспроводных оптических сетях для повышения их производительности и увеличения дальности связи для преодоления проблем, связанных с потерями при распространении сигнала в атмосфере.

93

Список литературы

1. *Vavoulas A., Sandalidis H. G., Varoutas D.* Weather effects on FSO network connectivity // *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2012. Vol. 4, iss. 10. P. 734–740. doi: 10.1364/JOCN.4.000734.
2. *El-Nayal M. K., Aly M. M., Fayed H. A., Abdel Rassoul R. A.* Adaptive free space optic system based on visibility detector to overcome atmospheric attenuation // *Results Phys*. 2019. Vol. 14. P. 102392.
3. *Das S., Chakraborty M.* ASK and PPM modulation based FSO system under varying weather conditions // *Proceedings of the 2016 IEEE 7th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*. N. Y., 2016. doi: 10.1109/UEMCON.2016.7777825.
4. *Wang Z., Zhong W. D., Fu S., Lin C.* Performance comparison of different modulation formats over free-space optical (FSO) turbulence links with space diversity reception technique // *IEEE Photonics J*. 2009. Vol. 1. P. 277–285.
5. *Молчанов С. В., Калекина С. О.* Применение когерентного временно-частотного мультиплексирования для повышения производительности атмосферной оптической системы связи // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки*. 2019. №2. С. 31–39.
6. *Hagenauer J.* Rate-compatible punctured convolutional codes (RCPC codes) and their applications // *IEEE Trans. Commun*. 1988. Vol. 36, №4. P. 389–400.
7. *Молчанов С. В., Яковлев А. С., Алещенко А. Н., Иванов А. И.* Применение орбитально-углового момента для пространственного разделения каналов атмосферной оптической линии связи // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки*. 2020. №2. С. 52–61.
8. *Ghassemlooy Z., Popoola W., Rajbhandari S.* *Optical Wireless Communications System and Channel Modelling with MATLAB*. CRC Press, 2013.

Об авторах

Сергей Васильевич Молчанов — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru



Сергей Николаевич Чижма — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SChizhma@kantiana.ru

Марина Дмитриевна Холмогорова — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: m.d.kholmogorova@gmail.com

The authors

Dr Sergey V. Molchanov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru

Prof. Sergey N. Chizhma, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SChizhma@kantiana.ru

Marina D. Kholmogorova, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: m.d.kholmogorova@gmail.com

† А. А. Зайцев, А. И. Руденко, С. М. Алексеева

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВОЛН В ДВУСЛОЙНОЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ПО ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ

Поступила в редакцию 18.06.2021 г.

Рецензия от 04.07.2021 г.

95

В работе представлена корректировка новой методики решения задачи о синусоидальных волнах на поверхности однородной идеальной жидкости, связанная с уточнением граничных условий. Найдено дисперсионное соотношение для длинных волн. Получено значение частоты для синусоидальных волн в стратифицированной жидкости.

The paper presents the correction of a new technique for solving the problem of sinusoidal waves on the surface of a homogeneous ideal fluid, associated with the refinement of the boundary conditions. The dispersion relation for long waves is found. The frequency value for sinusoidal waves in a stratified fluid is obtained.

Ключевые слова: двухслойная жидкость, синусоидальная волна, дисперсионное соотношение, фазовая скорость, приближение Буссинеска

Keywords: two-layer liquid, sine wave, dispersion relation, phase velocity, Bousinesq approximation

Введение

Наше исследование посвящено задаче по распространению синусоидальных волн в стратифицированной двухслойной жидкости. Заметим, что задача была рассмотрена, например, в классической монографии [1].

Так, ранее нами в работе [2] была приведена новая методика решения задачи о синусоидальных волнах на поверхности однородной идеальной жидкости, в основу которой был положен отличный от классического подход, связанный с потенциалом скорости [1]. Однако в [2] не были теоретически обоснованы граничные условия, поэтому в разделе I данной статьи выполнена корректировка методики, основанной на использовании характеристик волнового движения, и теоретически обоснованы граничные условия на свободной поверхности и на линии раздела стратифицированных слоев. Заметим, что в [3] не получено полное выражение для частоты синусоидальных волн, поэтому в разделе II на основе выделенных граничных условий выполнен детальный анализ синусоидальных волн в двухслойной стратифицированной жидкости.



I. Корректировка новой методики решения задачи о синусоидальных волнах на поверхности жидкости

Введем обозначения для встречающихся в статье величин. Пусть $\eta(x)$ – профиль свободной поверхности:

$$\eta(x) = a e^{i(\omega t - kx)}, \quad (1.1)$$

где a – амплитуда волны; $\omega t - kx$ – фаза волны; ω – частота; k – волновое число.

96

Отметим, что физический смысл формулы (1.1) сводится к тому, что среднее значение профиля синусоидальной волны равно нулю, осреднение проводится по периоду волны, при появлении волнения элементарные объемы жидкости выше и ниже горизонтального уровня одинаковы:

$$\eta(x) = 0. \quad (1.2)$$

Составляющие для скорости u, v – горизонтальная и вертикальная компоненты скорости элементарного объема жидкости.

В ходе рассмотрения возникают две неопределенности.

Первая связана с неоднозначностью горизонтальной компоненты скорости: для любого постоянного значения u_0 характерно преобразование

$$u \rightarrow u + u_0. \quad (1.3)$$

Фактически (1.3) есть дрейф волны. Отсутствие дрейфа волны осуществляется благодаря (1.2).

Вторая неопределенность – завихренность волновых движений, поэтому в статье считаем движение потенциальным.

Полное давление представляет собой сумму статического давления, зависящего от глубины жидкости (вертикальной координаты), и динамического:

$$p = p_s + p_d. \quad (1.4)$$

Постановка задачи о синусоидальных волнах в однородной жидкости

Определить u, v, p , которые в слое $-h < y < 0$ удовлетворяют уравнениям

$$\rho u_t + p_x = 0, \quad \rho v_t + p_y + \rho g = 0, \quad u_x + v_y = 0, \quad u_y - v_x = 0, \quad (1.5)$$

граничным условиям на дне

$$v = 0 \text{ при } y = -h \quad (1.6)$$



и на свободной поверхности

$$v = \eta_t = ia\omega e^{i(\omega t - kx)} \quad \text{при } y = 0, \quad (1.7)$$

$$p = 0 \quad \text{при } y = \eta, \quad (1.8)$$

условиям периодичности

$$\begin{aligned} u\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) &= u(x, y), \quad v\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) = v(x, y), \\ p\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) &= p(x, y), \end{aligned} \quad (1.9)$$

условиям отсутствия дрейфа

$$u(x, y) = 0. \quad (1.10)$$

На первом этапе упростим (1.5) с учетом (1.6-1.10), используя специальное представление для характеристик волнового движения, основанное на (1.1) для профиля синусоидальной волны.

Решение (1.5) следует искать с учетом (1.1) и (1.8) в следующем виде:

$$\begin{aligned} u &= u_r(y) e^{i(\omega t - kx)}, \\ v &= v_r(y) e^{i(\omega t - kx)}, \\ p &= p_r(y) e^{i(\omega t - kx)}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Индекс r указывает, что значения компонент скорости и давления выбраны в отдельном слое жидкости. Раздел жидкости обоснован стратификацией по плотности.

Тогда с учетом последнего выражения в (1.11) формула (1.4) примет вид

$$p = p_s(y) + p_r(y) e^{i(\omega t - kx)}. \quad (1.12)$$

Принимая во внимание (1.5), с учетом первых двух уравнений (1.11) получим

$$-iku_r(y) + v_r'(y) = 0, \quad u_r'(y) + ikv_r(y) = 0. \quad (1.13)$$

На втором этапе, решая совместно (1.13), получим линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка относительно функции $v_r(y)$:

$$v_r''(y) - k^2 v_r(y) = 0. \quad (1.14)$$

Общее решение (1.14) будет следующим:

$$v_r(y) = A \operatorname{sh}(k(y+h)) + B \operatorname{ch}(k(y+h)), \quad (1.15)$$

где A, B — произвольные вещественные константы.



Для их определения используем граничные условия:

$$v_r(y=0) = i\omega a, \quad v_r(y=-h) = 0.$$

Тогда установим, что $A = \frac{i\omega a}{sh(kh)}$, $B = 0$.

С учетом констант (1.15) примет вид

$$v_r(y) = \frac{i\omega a}{sh(kh)} sh(k(y+h)). \quad (1.16)$$

С учетом (1.16) первое уравнение (1.13) для функции $u_r(y)$

$$u_r(y) = \frac{\omega a}{sh(kh)} ch(k(y+h)). \quad (1.17)$$

Используя $\omega^2 = gk th(kh)$ для функций $u_r(y)$ (1.16) и $v_r(y)$ (1.17), запишем, что

$$\begin{aligned} u_r(y) &= a \sqrt{\frac{2gk}{sh(2kh)}} ch(k(y+h)), \\ v_r(y) &= ia \sqrt{\frac{2gk}{sh(2kh)}} sh(k(y+h)). \end{aligned} \quad (1.18)$$

Далее рассмотрим первое уравнение системы (1.5), которое затем преобразуем с учетом первых уравнений (1.11) и (1.12), а также используем дисперсионное соотношение $\omega^2 = gk th(kh)$. В результате получим, что выражение для функции $p_r(y)$ имеет вид

$$p_r(y) = \rho g a \frac{ch(k(y+h))}{ch(kh)}. \quad (1.19)$$

Третий этап посвящен утверждению о существовании и единственности решения краевой задачи для функций $u_r(y)$ и $v_r(y)$, постановка которой дана в начале данного пункта.

Утверждение. Для компонент скорости $u_r(y)$, $v_r(y)$, которые удовлетворяют нормальной системе дифференциальных уравнений

$$-iku_r(y) + v_r'(y) = 0, \quad u_r'(y) + ikv_r(y) = 0,$$

а также граничным условиям

$$u_r(0) = \varepsilon \frac{gk}{\omega} a, \quad v_r(0) = i\omega a, \quad v_r(-h) = 0,$$

существует зависимость $\omega = \sqrt{gk th(kh)}$.



Решение краевой задачи для функций $u_r(y)$ и $v_r(y)$ дается формулами (1.17), (1.18):

$$u_r(y) = \frac{\omega a}{sh(kh)} ch(k(y+h)) = a \sqrt{\frac{2gk}{sh(2kh)}} ch(k(y+h)),$$

$$v_r(y) = \frac{i\omega a}{sh(kh)} sh(k(y+h)) = ia \sqrt{\frac{2gk}{sh(2kh)}} sh(k(y+h)).$$

Для $p_r(y)$ дается формулой (1.19):

$$p_r(y) = \rho g a \frac{ch(k(y+h))}{ch(kh)}.$$

Исходя из приведенного утверждения можно выделить следующие замечания применительно к длинноволновому приближению.

Замечание 1. $\omega = c_0 k$, $c_0 = \sqrt{gh}$ – фазовая скорость.

Замечание 2. Выражения для гидродинамических характеристик:

$$u_r = a \sqrt{\frac{g}{h}}, \quad v_r = i \sqrt{\frac{g}{h}} a k (y+h), \quad p_r = \rho g a.$$

Замечание 3. $u_r(y) = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 u_r(y) dy = a \sqrt{\frac{g}{h}}$.

II. Синусоидальные волны в двухслойной жидкости

Рассмотрим решение задачи о колебаниях синусоидальных волн в стандартной постановке для случая двухслойной жидкости и произвольных длин волн. Отметим, что движение жидкости является потенциальным.

Физическая постановка задачи. Полное давление в каждом слое является суммой статической и динамической составляющих:

$$p_n = p_{sn}(y) + p_{nd}(y), \quad n = 1, 2.$$

Пусть d_1, d_2 – толщины слоев ($H = d_1 + d_2$); ρ_1, ρ_2 плотности первого и второго слоя соответственно, причем $\rho_1 < \rho_2$.

Тогда (1.5) для соответствующих слоев будет иметь вид

$$\rho_1 u_{1,t} + p_{1,x} = 0, \quad \rho_1 v_{1,t} + p_{1,y} + \rho_1 g = 0,$$

$$u_{1,x} + v_{1,y} = 0, \quad u_{1,y} - v_{1,x} = 0,$$

$$\rho_2 u_{2,t} + p_{2,x} = 0, \quad \rho_2 v_{2,t} + p_{2,y} + \rho_2 g = 0,$$



$$u_{2,x} + v_{2,y} = 0, \quad u_{2,y} - v_{2,x} = 0,$$

$$-d_1 + \eta_2 < y < \eta_1, \quad -H < y < \eta_1 < -d_1 + \eta_2.$$

Дополнительно запишем условия периодичности (1.9) применительно к слоям:

$$\eta_1\left(x + \frac{2\pi}{k}\right) = \eta_1(x), \quad u_1\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) = u_1(x, y),$$

$$v_1\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) = v_1(x, y), \quad p_1\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) = p_1(x, y),$$

$$\eta_2\left(x + \frac{2\pi}{k}\right) = \eta_2(x), \quad u_2\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) = u_2(x, y),$$

$$v_2\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) = v_2(x, y), \quad p_2\left(x + \frac{2\pi}{k}, y\right) = p_2(x, y).$$

Также запишем условия отсутствия дрейфа в каждом из двух слоев (1.10):

$$u_1(x, y) = 0, \quad u_2(x, y) = 0.$$

Рассмотрим граничные условия применительно для каждого слоя жидкости.

На свободной поверхности: $v_1(y = \eta_1) = \eta_{1,t}$, $p_1(y = \eta_1) = 0$. Условием на дне служит условие непротекания: $v_2(y = -H) = 0$.

Для кинематических условий должно выполняться требование

$$v_1(y = -d_1 + \eta_2) = v_2(y = -d_1 + \eta_2), \quad v_1(y = -d_1 + \eta_2) = +\eta_{2,t}.$$

Динамическое условие состоит в требовании непрерывности полного давления:

$$p_1(y = -d_1 + \eta_2) = p_2(y = -d_1 + \eta_2).$$

На первом этапе рассмотрим выражения для профиля и динамических характеристик синусоидальной волны и полного давления.

$$\eta_1(x) = a_1 e^{i(\omega t - kx)}, \quad \eta_2(x) = a_2 e^{i(\omega t - kx)}, \quad a_1, a_2 \neq 0. \quad (2.1)$$

$$u_1 = u_{r1}(y) e^{i(\omega t - kx)}, \quad v_1 = v_{r1}(y) e^{i(\omega t - kx)},$$

$$-d_1 + \eta_2 < y < \eta_1, \quad (2.2)$$

$$u_2 = u_{r2}(y) e^{i(\omega t - kx)}, \quad v_2 = v_{r2}(y) e^{i(\omega t - kx)},$$

$$-H < y < -d_1 + \eta_2, \quad (2.3)$$

$$p_1 = p_{s1}(y) + p_{r1}(y) e^{i(\omega t - kx)}, \quad -d_1 + \eta_2 < y < \eta_1, \quad (2.4)$$



$$p_2 = p_{s2}(y) + p_{r2}(y)e^{i(\omega t - kx)},$$

$$-H < y < -d_1 + \eta_2, \quad (2.5)$$

В (2.4), (2.5) статические составляющие полного давления по слоям имеют вид

$$p_{s1}(y) = -\rho_1 g y, \quad -d_1 < y < 0,$$

$$p_{s2}(y) = -\rho_2 g y + (\rho_1 - \rho_2) g d_1, \quad -H < y < -d_1.$$

Важным следствием является тот факт, что выражения для полных давлений относительно отдельного слоя будут иметь вид

$$p_1 = p_{r1}(y)e^{i(\omega t - kx)} - \rho_1 g y, \quad -d_1 + \eta_2 < y < \eta_1,$$

$$p_2 = p_{r2}(y)e^{i(\omega t - kx)} - \rho_2 g y + (\rho_1 - \rho_2) g d_1, \quad -H < y < -d_1 + \eta_2.$$

Далее формулы (2.1)–(2.5) переносим в общую постановку задачи данного пункта и после необходимых упрощений получаем соответственно постановку задачи о синусоидальных волнах в двухслойной жидкости с учетом граничных условий.

Задача о синусоидальных волнах в двухслойной жидкости. Найти функции $u_1, v_1, p_{r1}(y)$ на промежутке $-d_1 < y < 0$, а также функции $u_2, v_2, p_{r2}(y)$ на промежутке $-H < y < -d_1$, которые удовлетворяют системам уравнений

$$\rho_1 \omega u_{r1}(y) - k p_{r1}(y) = 0, \quad i \rho_1 \omega v_{r1}(y) + k p'_{r1}(y) = 0,$$

$$k u_{r1}(y) + i v'_{r1}(y) = 0, \quad u'_{r1}(y) + i k v_{r1}(y) = 0,$$

$$-d_1 < y < 0;$$

$$\rho_2 \omega u_{r2}(y) - k p_{r2}(y) = 0, \quad i \rho_2 \omega v_{r2}(y) + k p'_{r2}(y) = 0,$$

$$k u_{r2}(y) + i v'_{r2}(y) = 0, \quad u'_{r2}(y) + i k v_{r2}(y) = 0,$$

$$-H < y < -d_1,$$

а также граничным условиям

$$v_{r1}(y=0) = i \omega a_1, v_{r1}(y=-d_1) = i \omega a_2, v_{r2}(y=-d_1) = i \omega a_2,$$

$$v_{r2}(y=-H) = 0,$$

$$p_{r1}(y=0) = g \rho_1 a_1, p_{r1}(y=-d_1) - p_{r2}(y=-d_1) = g(\rho_1 - \rho_2) a_2.$$



Приведем общие решения задачи о синусоидальных волнах в двухслойной жидкости для верхнего и нижнего слоев жидкости. Применительно к верхнему слою можно записать

$$u_{r1}(y) = -iA_1 sh(ky) - iB_1 ch(ky),$$

$$v_{r1}(y) = B_1 sh(ky) + A_1 ch(ky),$$

$$p_{r1}(y) = -\rho_1 \frac{i\omega}{k} A_1 sh(ky) - \rho_1 \frac{i\omega}{k} B_1 ch(ky), \quad -d_1 < y < 0.$$

В случае нижнего слоя

$$u_{r2}(y) = -iD_1 sh(k(y+H)),$$

$$v_{r2}(y) = D_1 sh(k(y+H)),$$

$$p_{r2}(y) = -\rho_2 \frac{i\omega}{k} D_1 ch(k(y+H)),$$

$$-H < y < -d_1.$$

Коэффициенты A_1 , B_1 найдем из граничных условий на свободной поверхности

$$((v_{r1}(y=0) = i\omega a_1, p_{r1}(y=0) = g\rho_1 a_1):$$

$$A_1 = i\omega a_1, \quad B_1 = -\frac{kg a_1}{i\omega}.$$

С учетом данных коэффициентов решения для верхнего слоя будут иметь вид

$$u_{r1}(y) = \omega a_1 sh(ky) + \frac{kg a_1}{\omega} ch(ky),$$

$$v_{r1}(y) = -\frac{kg a_1}{i\omega} sh(ky) + i\omega a_1 ch(ky),$$

$$p_{r1}(y) = \rho_1 \frac{\omega^2}{k} a_1 sh(ky) + \rho_1 g a_1 ch(ky), \quad -d_1 < y < 0.$$

Для $y = -d_1$ определим $u_{r1}(y)$, $v_{r1}(y)$, $p_{r1}(y)$:

$$u_{r1}(y = -d_1) = -\frac{a_1}{\omega} (\omega^2 sh(kd_1) - kg ch(kd_1)),$$

$$v_{r1}(y = -d_1) = -\frac{a_1}{i\omega} (\omega^2 ch(kd_1) - kg sh(kd_1)),$$

$$p_{r1}(y = -d_1) = -\frac{\rho_1 a_1}{k} (\omega^2 sh(kd_1) - kg ch(kd_1)).$$



Для нижнего слоя можно записать $u_{r2}(y)$, $v_{r2}(y)$, $p_{r2}(y)$:

$$u_{r2}(y = -d_1) = iD_1 sh(kd_2),$$

$$v_{r2}(y = -d_1) = D_1 sh(kd_2),$$

$$p_{r2}(y = -d_1) = -\rho_2 \frac{i\omega}{k} D_1 ch(kd_2),$$

D_1 – вспомогательный параметр.

Тогда, учитывая граничные условия применительно к первому слою

$$v_{r1}(y = -d_1) = i\omega a_2 = -\frac{a_1}{i\omega} (\omega^2 ch(kd_1) - kg sh(kd_1)),$$

получаем, что

$$(\omega^2 ch(kd_1) - kg sh(kd_1))a_1 - \omega^2 a_2 = 0.$$

Аналогично поступая ($v_{r2}(y = -d_1) = i\omega a_2 = D_1 sh(kd_2)$), запишем:

$$i\omega a_2 - sh(kd_2)D_1 = 0.$$

Ориентируясь на последнее граничное условие ($p_{r1}(y = -d_1) - p_{r2}(y = -d_1) = g(\rho_1 - \rho_2)a_2$), также можно записать

$$\rho_1 (\omega^2 sh(kd_1) - kg ch(kd_1))a_1 + gk(\rho_1 - \rho_2)a_2 - \rho_2 i\omega ch(kd_2)D_1 = 0.$$

Полученную систему уравнений

$$(\omega^2 ch(kd_1) - kg sh(kd_1))a_1 - \omega^2 a_2 + 0D_1 = 0,$$

$$0a_1 + i\omega a_2 - sh(kd_2)D_1 = 0,$$

$$\rho_1 (\omega^2 sh(kd_1) - kg ch(kd_1))a_1 + gk(\rho_1 - \rho_2)a_2 - \rho_2 i\omega ch(kd_2)D_1 = 0$$

перепишем в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \omega^2 ch(kd_1) - kg sh(kd_1) & -\omega^2 & 0 \\ 0 & i\omega & -sh(kd_2) \\ \rho_1 (\omega^2 sh(kd_1) - kg ch(kd_1)) & gk(\rho_1 - \rho_2) & -\rho_2 i\omega ch(kd_2) \end{pmatrix}$$

$$\times \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ D_1 \end{pmatrix} = 0.$$



Введем обозначения:

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} \omega^2 ch(kd_1) - kg sh(kd_1) & -\omega^2 & 0 \\ 0 & i\omega & -sh(kd_2) \\ \rho_1(\omega^2 sh(kd_1) - kg ch(kd_1)) & gk(\rho_1 - \rho_2) & -\rho_2 i \omega ch(kd_2) \end{pmatrix},$$

$$\tilde{X} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ D_1 \end{pmatrix}.$$

104

Тогда имеем, что

$$\tilde{A}\tilde{X} = 0. \quad (2.6)$$

Нетривиальное решение (2.6) есть равенство нулю определителя матрицы $|\tilde{A}| = 0$. $|\tilde{A}|$ относительно ω представляет собой характеристический многочлен.

Выражение для характеристического многочлена:

$$\begin{aligned} & (\rho_1 sh(kd_1) sh(kd_2) + \rho_2 ch(kd_1) ch(kd_2)) \omega^4 + \\ & + gk((\rho_1 - \rho_2) sh(kd_2) ch(kd_1) - \rho_2 sh(kd_1) ch(kd_2) - \rho_1 sh(kd_2) ch(kd_1)) \omega^2 - \\ & - (\rho_1 - \rho_2) (gk)^2 sh(kd_1) sh(kd_2) = 0. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Очевидно, что (2.7) представляет собой биквадратное уравнение относительно ω .

Запишем приближения Буссинеска:

$$\rho_1 = \rho - \frac{\Delta\rho}{2}, \rho_2 = \rho + \frac{\Delta\rho}{2}, \Delta\rho \ll \rho. \quad (2.8)$$

С учетом (2.8) формулу (2.7) можно переписать:

$$\begin{aligned} & \left(\rho ch(kH) + \frac{\Delta\rho}{2} ch(k(d_1 - d_2)) \right) \omega^4 - gk \left(\rho + \frac{\Delta\rho}{2} \right) sh(kH) \omega^2 + \\ & + (gk)^2 \Delta\rho sh(kd_1) sh(kd_2) = 0. \end{aligned} \quad (2.9)$$

При $\Delta\rho = 0$ из формулы (2.9) можно получить, что $\omega = \sqrt{gk th(kH)}$.

Для длинноволновой области ($\omega^4 \ll \omega^2$) на основании (2.9) можно получить

$$\omega = \sqrt{\frac{(gk) sh(kd_1) sh(kd_2) \Delta\rho}{sh(kH) \left(\rho + \frac{\Delta\rho}{2} \right)}} \quad \text{или} \quad \omega = k \sqrt{\frac{g d_1 d_2 \Delta\rho}{H \left(\rho + \frac{\Delta\rho}{2} \right)}}.$$



Учитывая, что $\omega = c_0 k$, значение фазовой скорости таково:

$$c_0^2 = \frac{g d_1 d_2 \Delta \rho}{H \left(\rho + \frac{\Delta \rho}{2} \right)} = \frac{g d_1 d_2}{H} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}.$$

Результат решения биквадратного уравнения (2.9) относительно ω^2 имеет довольно громоздкий вид. Приведем его:

$$\omega^2 = \frac{2^{-1} g k}{\rho c h(kH) + \frac{\Delta \rho}{2} c h(k(d_1 - d_2))} \times$$

$$\times \left\{ \rho_2 \operatorname{sh}(kH) + \sqrt{\rho_1^2 c h^2(kH) + 2 \Delta \rho \rho_1 c h(kH) c h(k(d_1 - d_2)) + (\Delta \rho)^2 c h^2(k(d_1 - d_2)) - \rho_2^2} \right\}.$$

При $\Delta \rho = 0$ последняя формула также дает известное дисперсионное соотношение $\omega = \sqrt{gk \operatorname{th}(kH)}$.

Заключение

Проведенная корректировка новой методики позволяет уточнить граничные условия не только на свободной поверхности идеальной однородной стратифицированной жидкости, но и на линии раздела двух стратифицированных по плотности слоев. Правильность методики подтверждается тем фактом, что полученное дисперсионное соотношение полностью совпадает с ранее полученным в литературе результатом. Показано, что фазовые скорости длинных поверхностных и внутренних волн от волнового числа не зависят, то есть эти волны не обладают дисперсией.

Список литературы

1. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений. М., 1977.
2. Зайцев А.А., Кулаков П.А. Новый метод решения задачи о синусоидальных волнах на поверхности однородной идеальной жидкости // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2016. №4. С. 48–55.
3. Зайцев А.А., Кулаков П.А. Анализ синусоидальных волн в двуслойной жидкости // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки. 2016. №4. С. 32–43.

Об авторах

Анатолий Алексеевич Зайцев — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромышленного флота, Россия.

E-mail: alex-rudenko@bk.ru

Алексей Иванович Руденко — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромышленного флота, Россия.

E-mail: alex-rudenko@bk.ru



Светлана Михайловна Алексеева — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Россия.

E-mail: alekseeva-sm@mail.ru

The authors

Dr Anatoly A. Zaitsev, Associate Professor, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: alex-rudenko@bk.ru

Dr Alexey I. Rudenko, Associate Professor, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: alex-rudenko@bk.ru

Dr Svetlana M. Alekseeva, Associate Professor, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: alekseeva-sm@mail.ru

А. А. Еремеев

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЙ 5G В АВТОМАТИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

Поступила в редакцию 06.07.2021 г.

Рецензия от 14.07.2021 г.

Рассмотрены особенности применения технологии 5G в электроэнергетическом комплексе – автоматизированных системах распределительных сетей, системах релейной защиты и мониторинга. Особое внимание уделено анализу возникающих при этом проблем, связанных с разработкой технических стандартов, вопросам обеспечения безопасности сетей и необходимых зон покрытия. Проанализированы перспективы интеграции технологии 5G и распределительных электросетей.

The paper considers the features of the application of 5G technology in the electric power complex – in automated systems of distribution networks, relay protection and monitoring systems. Special attention is paid to the analysis of the problems arising in this case in technical standards, network security issues, ensuring the necessary coverage areas. The prospects of integration of 5G technology and power distribution networks are analyzed.

Ключевые слова: технология 5G, распределительная электросеть, облачная сеть радиодоступа (cRAN), контроль состояния сети, виртуальная сеть радиодоступа (vRAN)

Keywords: 5G technology, electrical distribution network, Cloud Radio Access Network (cRAN), monitoring the network status, Virtual Radio Access Network (vRAN)

Сеть связи электроэнергетики является ценным фундаментом, поддерживающим развитие электроэнергетических мощностей страны. Появление технологии 5G [1–5] позволит качественно улучшить все аспекты сетей связи, используемых в электроэнергетике [1–9]. Ожидается, что технология 5G будет играть роль «соединения всего» в сетях электросвязи [10]. По сравнению с технологией мобильной связи предыдущего поколения 5G обладает такими характеристиками, как большая пропускная способность, меньшая задержка, большая емкость и более обширные соединения [8]. Например, она стала ключевой технической основой для создания стратегии «три типа двух сетей» в Китае [11; 12]. Под влиянием стратегии «двух сетей» в будущем распределительная сеть будет глубоко интегрирована с технологией 5G, что позволит реализовать более высокие требования к экономичности, безопасности и надежности ее работы [7]. Создание повсеместного интернета вещей в энергетике проходит через все звенья энергосистемы и требует большого объема обнаружения и контроля для каждого узла распределительной сети [6]. Независимо от метода необходимо в реальном времени осуществлять обнаружение неисправностей и конт-



роль за состоянием работы распределительной сети, своевременно передавать управляющие сигналы, отправленные облачным сервером, каждому звену распределительной сети.

Дальнейшее расширение применения технологии 5G ускорит развитие автоматизации в распределительных сетях [13], что в значительной степени снимет проблемы нерационального использования электроэнергии и ее неравномерного распределения. В распределительной сети имеется большое количество объектов измерения и управления, таких как подстанции, подстанционные пункты, распределительные станции, распределительные трансформаторы и секционные выключатели. Обычно это сотни, тысячи или даже десятки тысяч объектов.

108

Поскольку значительная часть оборудования расположена в сложных географических условиях, зарытые волоконно-оптические линии и силовые беспроводные частные сети стали основными средствами передачи данных между терминалами. Из-за высокой стоимости оптической связи и отсутствия условий доступа к волоконно-оптическим линиям в некоторых районах, крупномасштабная подземная оптическая связь не может быть реализована в больших масштабах. В последние годы беспроводные частные сети 3G и 4G достигли выдающихся результатов в «последней миле» сети электросвязи, но некоторые показатели производительности 4G все еще не соответствуют стратегическим целевым требованиям, в отличие от технологии связи 5G [14]. Реализация автоматизации фидера (FA) постепенно перешла от некомуникационного метода, осуществляемого посредством регулировки времени автоматического повторного включения (АПВ), к централизованному интеллектуальному методу FA, который использует оконечное устройство фидера (FTU) или распределительное оконечное устройство (DTU) для обнаружения неисправностей и коммуникационную технологию для локализации неисправностей и восстановления электроснабжения на неисправных участках. Из-за недоверия к системе и оборудованию фидер является полуавтоматическим, ручным или не полностью автоматическим. В январе 2019 г. компания China Southern Power Grid взяла на себя инициативу по завершению испытания службы дифференциальной защиты в сети 5G в Шэньчжэне [11]. Этот тест показал, что технология 5G полностью соответствует различным услугам по управлению сетью в условиях сверхнизкой задержки. В мае того же года в Шэньчжэне завершился первый в мире синтез синхронного векторного измерения на основе распределительной сети 5G, что решило проблему абсолютной синхронизации времени и задержки между устройствами [13]. Исходя из этого можно заключить, что технология 5G будет играть ключевую роль в развитии распределительных электросетей в ближайшем будущем.

В настоящее время выделенная беспроводная связь 5G в основном используется для низковольтных распределительных шкафов в распределительных сетях, а небольшое количество распределительных станций применяют оптическую связь. Автоматическая диагностика и изоляция неисправностей в распределительной сети среднего напряжения не может быть гарантирована. Низковольтная распределительная сеть имеет низкую степень автоматизации и требует существенной рабочей силы и материальных ресурсов для обслуживания.



Традиционная технология определения места повреждения в основном делится на два метода: первый определяет место повреждения с использованием дополнительного оборудования, а второй — на основе измерительной информации распределительной линии. С помощью дополнительного оборудования место повреждения выявляется в основном методом секционирования и АПВ и методом индикации повреждения. Во втором методе точность определения места повреждения основана на измерительной информации распределительной линии. Решающим фактором является необходимость наличия достоверной измерительной информации для анализа с целью точного определения места повреждения. Современные технологии определения места повреждения достигают точного его определения путем оптимизации алгоритма или прогнозирования прохождения аварийных коллекторов.

На рисунке представлена упрощенная структурная схема системы связи 5G. Наиболее важная особенность централизованной системы заключается в том, что при возникновении постоянной неисправности ей необходимо загружать информацию об измерениях на главную станцию. Терминал мониторинга фидера каждого коммутатора или шкафа кольцевой сети должен взаимодействовать с главной станцией распределения электроэнергии, которая управляется базовой станцией. После этого диспетчер изолирует неисправность и применяет схемы самовосстановления для различных ситуаций. В работе [14] представлена централизованная интеллектуальная система автоматизации фидера на основе IEC61850 и подробно описана схема информационной последовательности изолирования и обнаружения неисправностей для этой системы. Непрерывный обмен информацией — очень сложный процесс. В таком решении непрерывной изоляции, требующем загрузки и выгрузки, только сеть 5G с большой пропускной способностью, низкой задержкой и высокой надежностью может обеспечить поддержку технологии связи и повысить эффективность изоляции неисправностей на первоначальной основе.

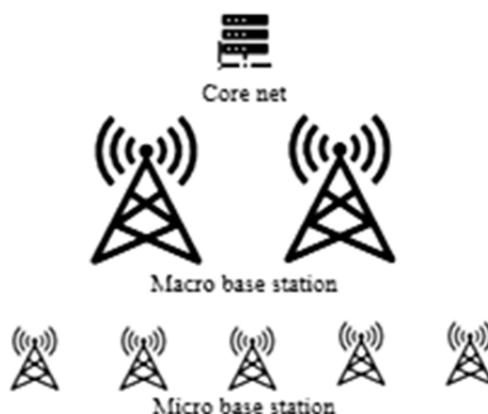


Рис. Упрощенная структурная схема системы связи 5G



Благодаря своей селективности и эффективности дифференциальная защита стала надежным селективным методом основной защиты оборудования энергосистемы. Дифференциальная защита основана на законе тока Кирхо (KCL) [11], который сравнивает входящие и выходящие токи реле на обоих концах защитной секции для определения внутренних и внешних неисправностей и принятия мер. Надежность дифференциальной защиты полностью зависит от системы связи на обоих концах линии. Наибольшее ограничение ранних систем дифференциальной защиты с заглубленными кабелями и воздушными линиями, используемыми в качестве средств связи, заключается в том, что длина защиты ограничена и реле на обоих концах теряют свои первоначальные функции при отключении линии. После этого появилась и до сих пор применяется дифференциальная защита, использующая оптические кабели и цифровые сети связи в качестве среды передачи данных, которая компенсирует предыдущее поколение дифференциальной защиты и в значительной степени устраняет недостатки потери функций реле из-за отключения линии. В то же время реле могут игнорировать изменения параметров системы. Соответственно, авторы [12] предлагают построить схему защиты от перепадов на расстоянии 30 км, соединив защитные реле на передающем и принимающем концах при помощи беспроводной сети передачи данных. Благодаря большой емкости и широкому покрытию технология 5G позволит в этом случае увеличить число используемых релейных соединений, а низкая временная задержка даст возможность передавать информацию и данные максимально точно и быстро.

Еще одной первоочередной задачей является обеспечение безопасности и стабильности климатических параметров внутри помещений распределения электроэнергии. С использованием датчиков, установленных в распределительных помещениях, и технологии связи 5G информация о температуре, влажности и наличии опасных газов в помещениях может быть передана дежурному персоналу в режиме реального времени.

При традиционном управлении распределительными помещениями необходимо выделить персонал для регулярного осмотра и мониторинга электрооборудования. В нашем случае технология 5G может быть интегрирована с существующими датчиками. Например, вокруг трансформатора устанавливаются датчики для получения данных о рабочей температуре трансформатора, ускорении его бака и электрической мощности трансформатора, а затем проводится мониторинг и анализ этих данных. После этого данные в режиме реального времени загружаются персоналу мониторинга через сеть связи 5G. При возникновении аномалии сигнал тревоги из помещения распределения электроэнергии может быть получен в кратчайшие сроки, в результате будет автоматически сгенерирован и рассчитан набор подходящих решений по устранению неисправности. Таким образом будет в наибольшей степени обеспечена нормальная работа оборудования в помещении распределения электроэнергии. Эффективность контроля и обслуживания помещения распределения электроэнергии также может быть улучшена, а стоимость контроля — снижена.



Благодаря своим небольшим размерам, удобству установки и низкой стоимости фазоизмерительные устройства (PMU) распределительных сетей среднего напряжения привнесут качественное улучшение в технологию диагностики и локализации неисправностей в этих сетях. Сочетание PMU и технологии 5G будет постепенно развиваться в направлении визуализации работы распределительной сети, что зависит от основных характеристик и технологий 5G. Помещения распределения электроэнергии могут построить сотовую сеть 5G и полагаться на большую пропускную способность, низкую задержку и большую емкость технологии 5G. Комнаты распределения электроэнергии могут не только контролировать работу распределительной сети в режиме реального времени, но и получать большое количество точных данных о терминалах и шинах, а также о рабочем состоянии оборудования. Большой объем визуализированных данных передается клиенту для мониторинга и управления в режиме реального времени. Технология 5G может обеспечить более высокую скорость загрузки и выгрузки данных для поддержки передачи видео и изображений высокого разрешения во время ремонтных процессов; в то же время эти данные будут возвращаться в центр в режиме реального времени. Технология связи 5G не только дает возможность визуализации распределительной сети, но и повышает эффективность ее ежедневного осмотра, снижает затраты и повышает эффективность работы.

Важной составной частью и ключевым звеном в автоматизированной системе распределительной сети является кольцевой главный блок, поэтому большое значение имеет интеграция с ним системы автоматического мониторинга и обнаружения. Традиционный кольцевой главный блок в основном рассчитан на подключение электрических или оптических кабелей для реализации многоточечного обнаружения и контроля. Проводная передача данных увеличивает сложность линии внутри конструкции и повышает угрозы ее безопасности. Стандарт реального времени для онлайн-мониторинга кольцевого главного блока очень строгий. Благодаря своим основным характеристикам технология 5G может заменить существующую передачу данных в проводных и беспроводных сетях общего пользования, обеспечить мониторинг в реальном времени и снизить стоимость без увеличения сложности основного блока кольца. Несколько блоков в главном кольцевом устройстве также будут лучше выполнять свои функции благодаря интеграции технологии связи 5G. Например, блок обработки сигналов внутри основного блока кольца должен управлять возвращаемым телеметрическим сигналом, удаленным сигналом и другими устройствами управления, одновременно осуществляя визуальное онлайн-обнаружение в режиме реального времени для основного блока кольца.

Технология 5G закладывает основу для будущего применения технологии онлайн-мониторинга в интеллектуальных сетях. Распределительный трансформатор представляет собой важное базовое оборудование для работы распределительной сети, поэтому мониторинг его данных необходим. При этом в режиме реального времени можно своевременно обнаружить и устранить аномальное рабочее состояние распределительных трансформаторов.



В первой половине 2020 г. завершилось техническое замораживание стандарта релиза R16 для технологии 5G и началось создание стандартов сверхнадежной связи с низкой задержкой (URLLC) [15]. В релизе 18 (R18) 3GPP, который является первым определением сквозной стандартной архитектуры 5G+ интеллектуальных сетей, были созданы интеллектуальные сети. Исследования того, как технология 5G может поддерживать бизнес-потребности распределительных и даже электрических сетей, все еще находятся на начальной стадии, и потребуются много времени, чтобы заморозить технический стандарт R18.

В будущем все распределительные терминалы будут интегрированы с технологией 5G: например, коммуникационный модуль технологии 5G будет встроено в распределительный терминал. В настоящее время продолжают соответствующие исследования коммуникационных терминалов 5G, при том что рынок интеллектуальных коммуникационных терминалов уже насыщен. Хотя появление технологии 5G даст коммуникационным терминалам возможность вновь выйти на рынок, но отрасли, поддерживающие данную технологию, не в состоянии обеспечить развитие коммуникационных терминалов 5G и их массовое производство.

Необходимо решить проблему безопасности технологии сетевого среза в технологии связи 5G. В настоящее время существует множество новых угроз безопасности в технологии нарезки, специально адаптированной к распределительной сети. Для новой сетевой атаки это означает ответ на вопрос, сможет ли сеть противостоять атаке извне при внедрении сетевого слайсинга. Поскольку сетевой срез формируется несколькими виртуальными сетями, разделенными физическими сетями, возможно достичь максимального уменьшения взаимного влияния. Только обеспечив эксплуатационную безопасность распределительной сети, мы можем продолжать продвигать и применять технологию нарезки сетей в ней.

Еще одной проблемой, которую необходимо решить при применении технологии 5G, является экономическая эффективность сети, то есть выбор сети общего пользования или частной сети. По сравнению с публичными сетями частные имеют преимущества в безопасности сети, скорости передачи информационных данных, относительно плавном переключении и перевыборе сигнала, но стоимость их строительства несопоставима со стоимостью публичных сетей. Технология 5G обеспечивает высокую скорость передачи данных, и передача данных посредством нее также стоит дороже. Проблема строительства сети заключается в том, что она должна быть разумно организована в диапазоне приемлемых затрат. Поэтому при условии, что операторы смогут в будущем открыть систему архитектуры сети и совместно обсудить набор подходящих схем выбора сети, оптимальная схема также может быть использована для разумного проектирования различных требований к распределительной сети. Для обеспечения безопасности, гибкости и надежности распределительная сеть и технология 5G могут быть интегрированы на глубоком уровне.



На основании вышеизложенного можно заключить, что внедрение технологии 5G изменит архитектуру традиционной мобильной связи и ее безопасность. Для некоторых распределительных сетей можно объединить технологии связи 5G и совместно с операторами разработать набор сетевых структур, объединяющих частные сети и сети общего пользования, чтобы подготовить почву для перехода — например, представить недорогую, ориентированную на данные беспроводную сеть следующего поколения и технологию гигабитной беспроводной локальной сети на основе оптической беспроводной сети для удовлетворения требований сети связи 5G. Кроме того, необходимо учитывать расположение построенных базовых станций 5G, вопросы сигнала, безопасности и защиты от помех. Необходимы дальнейшие исследовательские программы по интеграции технологии 5G в распределительную сеть.

Список литературы

1. Risteska-Stojkoska B. L., Trivodaliev K. V. A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 140. P. 1454–1464.
2. Wang S., Zhu L., Zhang Z., Zhang S. Research on single phase grounding fault detection technology of distribution grid based on intelligent variable terminal // *Power System Technology*. 2019. Vol. 43, №12. P. 4291–4298.
3. Liu J., Chen L., Zhang Z. Estimation of static parameters testability for distribution grid considering the effect of measurement errors // *Power System Technology*. 2020. Vol. 44, №4. P. 1481–1487.
4. Hu S., Chen X., Ni W. et al. Modeling and analysis of energy harvesting and smart grid-powered wireless communication networks: a contemporary survey // *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2020. Vol. 4, №2. P. 461–496.
5. Tao W., Dou K., Chen F. et al. Comparison and technical analysis of phasor data access modes in distribution grid // *Power System Technology*. 2019. Vol. 43, №3. P. 784–792.
6. Liu J., Ni J., Xu L. Management of distribution automation system (DAS) // *Power System Technology*. 1998. Vol. 8. P. 3–5.
7. Wu Y., Gao H., Xu B. et al. Distributed fault self-healing scheme and its implementation for active distribution grid // *Automation of Electric Power Systems*. 2019. Vol. 43, №9. P. 140–155.
8. Lin L., Qi B., Li B. et al. Requirements and developing trends of electric power communication network for new services in electric Internet of Things // *Power System Technology*. 2020. Vol. 44, №8. P. 3114–3130.
9. Zhu Z., Xu B., Yip T. et al. IEC 61850 based models for distributed feeder automation system // *Automation of Electric Power Systems*. 2018. Vol. 42, №23. P. 148–156.
10. Ghosh A., Maeder A., Baker M., Chandramouli D. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15 // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 127639–127651.
11. Shafi M., Molisch A. F., Smith P. J. et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2017. Vol. 35, №6. P. 1201–1221.



12. Parvez I., Rahmati A., Guvenc I. et al. A survey on low latency towards 5G: RAN, core network and caching solutions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20, №4. P. 3098–3130.

13. Andrews J.G., Buzzi S., Choi W. et al. What will 5G be // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32, №6. P. 1065–1082.

14. Agiwal M., Roy A., Saxena N. Next generation 5G wire-less networks: a comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18, №3. P. 1617–1655.

15. Zhu T., Qian A., He X. et al. An overview of data-driven electricity consumption behavior analysis method and application // Power System Technology. 2020. Vol. 44, №9. P. 3497–3507.

Об авторах

Александр Алексеевич Еремеев — студ., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AAЕremeev@stud.kantiana.ru

The author

Aleksandr A. Eremeev, Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AAЕremeev@stud.kantiana.ru

ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ВЕСТНИКЕ БФУ ИМ. И. КАНТА

Правила публикации статей в журнале

1. Представляемая для публикации статья должна быть актуальной, обладать новизной, содержать постановку задач (проблем), описание основных результатов исследования, полученных автором, выводы, а также соответствовать правилам оформления.

2. Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не публиковавшимся ранее в других печатных изданиях. При отправке рукописи в редакцию журнала автор автоматически принимает на себя обязательство не публиковать ее ни полностью, ни частично без согласия редакции.

3. Рекомендованный объем статьи для докторантов и докторов наук — 20–30 тыс. знаков с пробелами, для доцентов, преподавателей и аспирантов — не более 20 тыс. знаков.

4. Список литературы должен составлять от 15 до 30 источников, не менее 50 % которых должны представлять современные (не старше 10 лет) публикации в изданиях, рецензируемых ВАК и (или) международных изданиях. Оптимальный уровень самоцитирования автора — не выше 10 % от списка использованных источников.

5. Все присланные в редакцию работы проходят *внутреннее и внешнее рецензирование*, а также проверку системой «Антиплагиат», по результатам которых принимается решение о возможности включения статьи в журнал.

6. Статья на рассмотрение редакционной коллегией направляется ответственному редактору по e-mail. Контакты ответственных редакторов: http://journals.kantiana.ru/vestnik/contact_editorial/

7. Статьи на рассмотрение принимаются в режиме онлайн. Для этого авторам нужно зарегистрироваться на портале Единой редакции научных журналов БФУ им. И. Канта http://journals.kantiana.ru/submit_an_article и следовать подсказкам в разделе «Подать статью онлайн».

9. Решение о публикации (или отклонении) статьи принимается редакционной коллегией журнала после ее рецензирования и обсуждения.

10. Автор имеет право публиковаться в одном выпуске «Вестника Балтийского федерального университета им. И. Канта» один раз; второй раз в соавторстве — в исключительном случае, только по решению редакционной коллегии.

Комплектность и форма представления авторских материалов

1. Статья должна содержать следующие элементы:

1) индекс УДК — должен достаточно подробно отражать тематику статьи (основные правила индексирования по УДК см.: <http://www.naukapro.ru/metod.htm>);

2) название статьи строчными буквами на русском и английском языках (*до 12 слов*);

3) аннотацию на русском и английском языках (*150–250 слов, то есть 500 печатных знаков*). Располагается перед ключевыми словами после заглавия;

4) ключевые слова на русском и английском языках (*4–8 слов*). Располагаются перед текстом после аннотации;

5) список литературы (*примерно 25 источников*) оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5. — 2008;

7) сведения об авторах на русском и английском языках (Ф. И. О. полностью, ученые степени, звания, должность, место работы, e-mail, контактный телефон);

8) сведения о языке текста, с которого переведен публикуемый материал.

2. Ссылки на литературу в тексте статей даются только в квадратных скобках с указанием номера источника из списка литературы, приведенного в конце статьи: первая цифра — номер источника, вторая — номер страницы (например: [12, с. 4]).

3. Рукописи, не отвечающие требованиям, изложенным в пункте 1, в печать не принимаются, не редактируются и не рецензируются.

Общие правила оформления текста

Авторские материалы должны быть подготовлены *в электронной форме* в формате листа А4 (210 × 297 мм).

Все текстовые авторские материалы принимаются исключительно в формате *doc* и *docx* (Microsoft Office).

Подробная *информация о правилах оформления текста*, в том числе *таблиц, рисунков, ссылок и списка литературы*, размещена на сайте Единой редакции научных журналов БФУ им. И. Канта: <http://journals.kantiana.ru/vestnik/monograph/>.

Рекомендуем авторам ознакомиться с информационно-методическим комплексом «Как написать научную статью»: <http://journals.kantiana.ru/authors/imk/>.

Порядок рецензирования рукописей статей

116

1. Все научные статьи, поступившие в редколлегию Вестника БФУ им. И. Канта, подлежат обязательному рецензированию. Отзыв научного руководителя или консультанта не может заменить рецензии.

2. Ответственный редактор серии определяет соответствие статьи профилю журнала, требованиям к оформлению и направляет ее на рецензирование специалисту, доктору или кандидату наук, имеющему наиболее близкую к теме статьи научную специализацию.

3. Сроки рецензирования в каждом отдельном случае определяются ответственным редактором серии с учетом создания условий для максимально оперативной публикации статьи.

4. В рецензии освещаются следующие вопросы:

а) соответствует ли содержание статьи заявленной в названии теме;

б) насколько статья соответствует современным достижениям научно-теоретической мысли;

в) доступна ли статья читателям, на которых она рассчитана, с точки зрения языка, стиля, расположения материала, наглядности таблиц, диаграмм, рисунков и формул;

г) целесообразна ли публикация статьи с учетом ранее выпущенной по данному вопросу литературы;

д) в чем конкретно заключаются положительные стороны, а также недостатки статьи, какие исправления и дополнения должны быть внесены автором;

е) рекомендуется (с учетом исправления отмеченных рецензентом недостатков) или не рекомендуется статья к публикации в журнале, входящем в Перечень ведущих периодических изданий ВАК.

5. Рецензирование проводится конфиденциально. Автор рецензируемой статьи может ознакомиться с текстом рецензии. Нарушение конфиденциальности допускается только в случае заявления рецензента о недостоверности или фальсификации материалов, изложенных в статье.

6. Если в рецензии содержатся рекомендации по исправлению и доработке статьи, ответственный редактор серии направляет автору текст рецензии с предложением учесть их при подготовке нового варианта статьи или аргументированно (частично или полностью) их опровергнуть. Доработанная (переработанная) автором статья повторно направляется на рецензирование.

7. Статья, не рекомендованная рецензентом к публикации, к повторному рассмотрению не принимается. Текст отрицательной рецензии направляется автору по электронной почте, факсом или обычной почтой.

8. Наличие положительной рецензии не является достаточным основанием для публикации статьи. Окончательное решение о целесообразности публикации принимается редколлегией серии.

9. После принятия редколлегией серии решения о допуске статьи к публикации ответственный секретарь серии информирует об этом автора и указывает сроки публикации.

Текст рецензии направляется автору по электронной почте, факсом или обычным почтовым отправлением.

10. Оригиналы рецензий хранятся в редколлегии серии и редакции «Вестника Балтийского федерального университета им. И. Канта» в течение пяти лет.