

Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал
№ 3 (106)/2023 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

• **Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

• **Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

• **Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Pham Trong Hung, Phan Nhat Giang, Nguyen Tien Tai</i> ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE ULTRASONIC JAMMING ON RECORDING DEVICES3	<i>Мельников В.С.</i> УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ОТ АВАРИЙ И ПОЖАРОВ 16
<i>Белоконь О.С., Яковенко Е.Г.</i> ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ8	<i>Рысин А.В., Бойкачев В.Н., Наянов А.М.</i> СПОСОБ КОНСТРУКТИВНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ АНТЕНН АФАР ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ (КА) НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ (НССС) ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МАССА – ГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК 30
<i>Калушин А.А.</i> К ВОПРОСУ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННО- СПРАВОЧНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК ОПАСНЫХ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУЗОПРАВИТЕЛЯМИ12	

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE ULTRASONIC JAMMING ON RECORDING DEVICES

*Pham Trong Hung, Phan Nhat Giang,
Nguyen Tien Tai*

Military Technical Academia, PhD, MA, Vietnam Republic

ABSTRACT

The paper evaluates the effect of ultrasonic noise on audio recording devices. Ultrasonic noise is generated in the recording device by a nonlinear effect in the receiver. Research results have shown that in the amplitude modulation and frequency modulation signals, the frequency modulation noise does not create audible signal, ensuring the efficiency and confidentiality for the noise jammer using ultrasonic waves.

Keywords: inaudible jamming; non-linear effect; jamming micro.

1. INTRODUCTION

There are many methods of generating jam for recording devices, either with audio signals [1] but audible jammers, aiming at comparable performance, would need to play white noise at a loudness of 97 dB SPL, considered seriously harmful to human ears [2] or with an ultrasonic jamming signal [3], [4]. In practice, ultrasonic jammers still produce audible sound, and that makes ultrasonic jammers unsecured, not suitable for practical use where covert arrangements are required in closed meeting rooms. The paper presents the causes of this audible sound generation in recorders jamming devices using ultrasonic signals and proposes solutions to reduce this audible sound and then investigates and evaluates the possibility of various types of ultrasonic jamming signal on recording devices. The paper is presented as follows: part 2 presents nonlinear effects in the sound speaker and microphone, part 3 evaluates the effectiveness of amplitude modulated and frequency modulated ultrasonic signals, part 4 investigates the frequency modulated ultrasonic signal on microphones, section 5 is the conclusion.

2. NONLINEAR EFFECT IN THE SPEAKERS AND MICROPHONES

2.1. Principle of inaudible noise on microphone devices using ultrasonic waves

Most human ears can only hear sound waves at frequencies less than 20 kHz and cannot hear ultrasonic signals. However, it is still possible to create audio noise at ultrasonic frequencies on the microphone device because after the signal enters the microphone it will leak into the audible spectrum and create a noisy signal inside the microphone's receiver circuit. The fact that the ultrasonic signal can leak into the microphone is due to the nonlinear effect [5], which is an inherent characteristic of microphone devices in a certain frequency range with a sufficiently large input signal power level. This part of the noise will enter the microphone's receiver circuit, causing the microphone's recording function to be jammed.

2.2. Nonlinear effects in speaker and microphone devices

Receiver modules are usually linear systems, meaning that the output signal is a linear combination

of the input signal. Then if the input signal of the preamplifier is S_{in} , the output signal is:

$$S_{out} = A_1 S_{in} \quad (1)$$

where A_1 is the gain that can change depending on the phase or amplitude of the input frequency but does not generate new frequencies. This feature makes it possible for the microphone to accurately record (with greater power) a copy of the input audio signal and output it to the speaker without distortion.

However, in practice, audio amplifiers usually only maintain linear characteristics in the audio frequency range, beyond this range, it will have a nonlinear response. The diaphragm also has such properties. For frequencies $f > 25$ kHz, the recorded output audio signal S_{out} can be represented through the input signal S_{in} in the form:

$$S_{out} = \sum_{i=1}^{\infty} A_i S_i = A_1 S_1 + A_2 S_2 + A_3 S_3 + \dots \quad (2)$$

When two signals of different frequencies pass through a nonlinear device, inter-modulation will produce extra frequencies [6]. For example, if two signals with frequencies f_1 and f_2 are fed to a nonlinear device, it will produce extra frequencies such as $2f_1 - f_2$ và $2f_2 - f_1$ (third order intermodulation) and frequencies $3f_1 - 2f_2$, $3f_2 - 2f_1$ (quaternary intermodulation) will also be generated. In general, the amplitude of the intermodulation components will decrease as the order of intermodulation is higher [6].

In a microphone consists of 4 components: transducer, amplifier, low-pass filter and digital-to-analog converter ADC. The low-pass filter has a cutoff frequency of 20 kHz (the frequency range that the human ear can hear is 20 Hz–20 kHz). The input and output signals are represented by the expression:

$$S_{out} = \sum_{i=1}^{\infty} A_i S_i = A_1 S_1 + A_2 S_2 + A_3 S_3 + \dots \quad (3)$$

In which the second component onwards is the nonlinear characteristic of the microphone hardware.

To create a nonlinear effect, need two ultrasonic signal sources with frequencies f_1, f_2 . So the input signal before the vibrating diaphragm of the microphone is:

$$S_{in} = A_1 \sin 2pf_1t + A_2 \sin 2pf_2t \quad (4)$$

After passing through the vibrating diaphragm and the microphone preamplifier, the output signal has the form (exponent 3 omitted):

$$S_{out} = (A_1 \sin 2pf_1t + A_2 \sin 2pf_2t) + (A_1 \sin 2pf_1t + A_2 \sin 2pf_2t)^2 \quad (5)$$

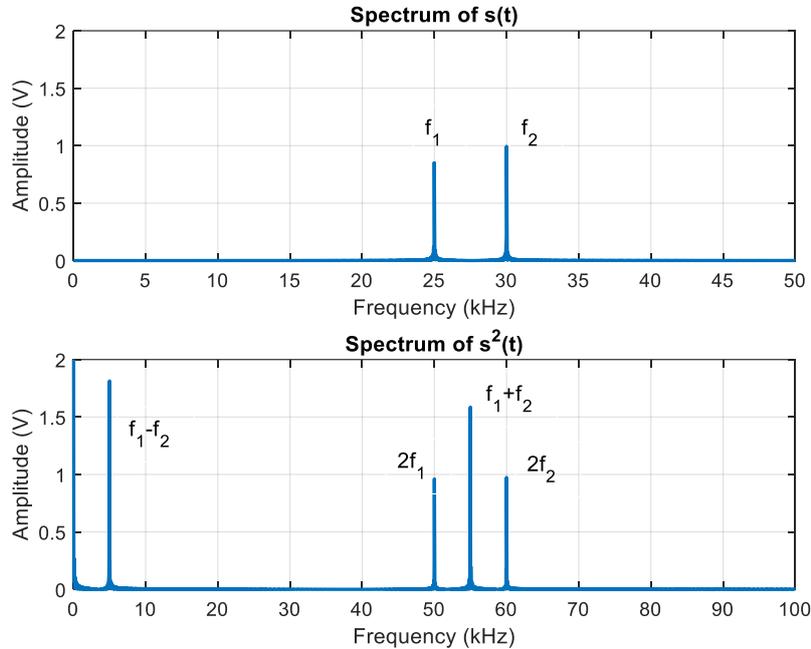


Figure 1. The nonlinear effect with 2 input frequencies

Thus, ultrasonic frequency carriers can be used to transmit audible noise to the microphone through a nonlinear effect at the input to the recording devices.

3. ULTRASONIC JAMMING

The traditional jamming technique is to introduce strong white noise into the receiver to reduce the SNR of the useful signal. It can be done through modulation of carrier frequency f_c with white noise, the bandwidth of the noise is guaranteed to be within the speech spectrum, i.e. less than 3.4 kHz. The frequency of the second carrier signal must also be within the resonant frequency of the ultrasonic speaker and the diaphragm of the recording device.

The process of generating ultrasonic noise is as follows: the signal generator will generate noise at the ultrasonic frequency, this signal must ensure the ability to enter the amplifier (if the ultrasonic frequency is too high, it will not pass through the transducer since it depends on its vibrating capability) and passes through the transducer to transmit to the medium. When this signal is picked up by the microphones, this noise signal will enter the audible range, distorting any recording process especially the recording of human voice.

3.1. Amplitude modulation noise

Using monochromatic signals, one of which is amplitude modulated with $m(t)$. So the input signal has the form:

$$S_1 = A_1 \sin w_1t \quad (6)$$

$$S_2 = A_2 \sin w_m t \sin w_2t \quad (7)$$

Where ω_2 is the second ultrasonic frequency. These two signals reach the microphone and no nonlinear effect occurs.

However, when the modulated signal S_2 passes through the speaker, a nonlinear effect, the squared component of the amplifier output will occur:

$$\begin{aligned} S_{out,AM}^2 &= (A_2 \sin w_m t \sin w_2t)^2 \\ &= \frac{A_2^2}{4} \{ \cos(w_2t - w_m t) - \cos(w_2t + w_m t) \}^2 \\ &= \frac{A_2^2}{4} \cos(2w_m t) + X \end{aligned} \quad (8)$$

where: X are components with a frequency higher than ω_m and DC components.

As a result, a signal component is generated $\cos(2w_m t)$. For the modulated noise frequency f_m less than 10 kHz, corresponding to $2f_m = 20$ kHz still within the audible frequency range. As such, this signal will generate noise and expose the jammer. Therefore, it can

be asserted that the use of amplitude modulation noise will not guarantee the confidentiality of the jammer.

Figure 2 is an example of an ultrasonic noise signal at the center frequency 40 kHz, is noise amplitude modulated with frequency $f_m=5$ kHz and be captured by the microphone device. It can be seen that the nonlinear effect produces the frequencies 80 kHz, 75 kHz, 85 kHz

and frequency $2f_m=10$ kHz. The higher frequencies than 25 kHz will be eliminated due to the microphone's input filter, the frequencies less than 20 kHz are within the cutoff frequency of the filter, so they can still reach the amplifier. This component is the intentional jam caused to the microphone device.

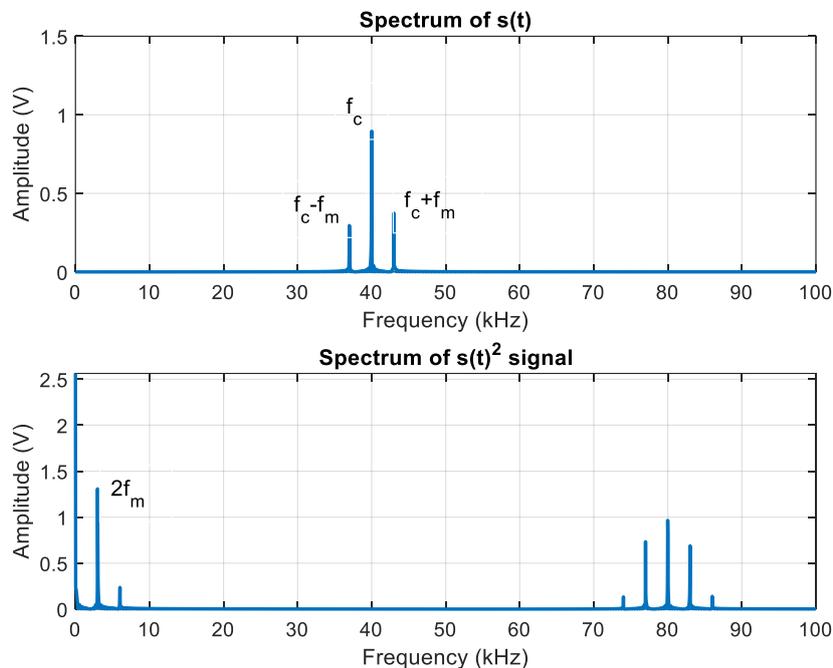


Figure 2. An illustration of the amplitude modulated noise

3.2. Frequency modulation noise

Unlike AM signals, FM signals are not demodulated or frequency shifted as they pass through the nonlinear speaker. Assume the frequency modulated signal has the form:

$$S_{fm} = \sin(\omega_c t + b \sin(\omega_m t)) \quad (9)$$

When there is a nonlinear effect, the squared component of the output signal due to the nonlinear effect has the form:

$$S_{fm}^2 = \left\{ \sin(\omega_c t + b \sin(\omega_m t)) \right\}^2 = 1 + \cos(2\omega_c t) + 2b \sin(\omega_m t) \cos(2\omega_c t) + B \quad (10)$$

where B are the DC components and other frequency components. So with a carrier frequency ω_c then the output of the speaker contains the frequency component $2\omega_c$ is higher than the audible frequency. This will not create an audible signal into the environment. In addition, ultrasonic speakers have a poor response at high frequencies, so the energy is mainly concentrated in frequencies ω_c .

To be able to put the noise signal into the microphone of the recording devices to be suppressed, it is necessary to shift the frequency ω_c to the audible

frequency range of the microphone without affecting the signal emitted from the speaker. That means, a second ultrasonic signal is required to be emitted from the second speaker near the first speaker. Assuming the second source has a carrier frequency ω_2 , the signal to the vibrating diaphragm of the microphone has a simple form:

$$S_{fm}^{Rx} = \sin(\omega_c t + b \sin(\omega_m t)) + \sin(\omega_2 t) \quad (11)$$

After passing through the microphone, a nonlinear effect will occur with the squared component of this signal $(S_{fm}^{Rx})^2$. Mathematically expanding the above expression will get the frequency components $(\omega_c - \omega_2)$, $(\omega_c + \omega_2)$, $2\omega_c$, $2\omega_2$. If $(\omega_c - \omega_2)$ less than the cutoff frequency of the low-pass filter, this signal will enter the microphone of the recording device.

Figure 3 illustrates the case of using frequency modulated noise with frequencies $f_1=35$ kHz and $f_2=45$ kHz when passing through the ultrasonic speaker. It can be seen that the generated frequencies are all higher than the carrier frequency f_1 , f_2 are all inaudible frequencies, which means that when using a frequency modulation signal to output the speaker, no audible noise will be generated.

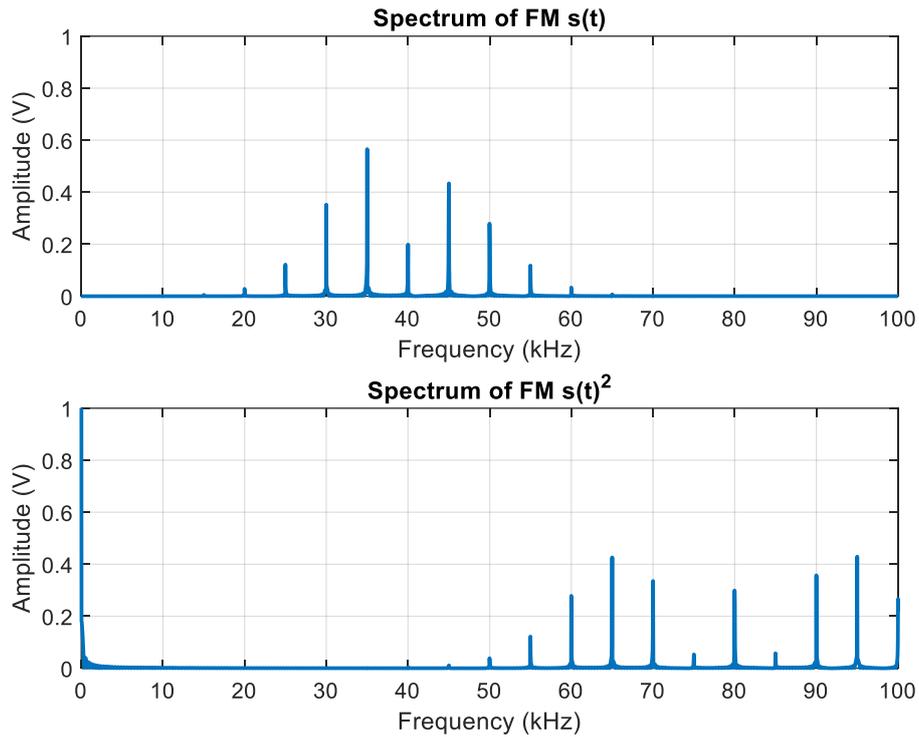


Figure 3. The frequency modulated noise

4. ASSESSMENT OF ULTRASONIC JAMMING USING FREQUENCY MODULATED SIGNAL

In this section, the possibility of frequency modulated ultrasonic noise is studied on the microphone device. Two ultrasonic frequencies are emitted through the speaker into space. First frequency $f_1=40$ kHz is the monochromatic carrier, the second frequency $f_2=45$ kHz is a frequency modulated signal with a spectrum width in the speech spectrum equals to

3 kHz. Figure 4 is the simulation result on Matlab. Figure 4 shows that the signal at the output of the speaker for two signals with frequencies f_1 and f_2 does not produce an audible signal component (Fig 4.a). However, when a nonlinear effect occurs in the receiver part of the microphone, an audible frequency of $f_2-f_1=5$ kHz with bandwidth equals 6 kHz is produced. This acoustic wave component reaches the receiver output and suppresses the speech signals at the microphone input.

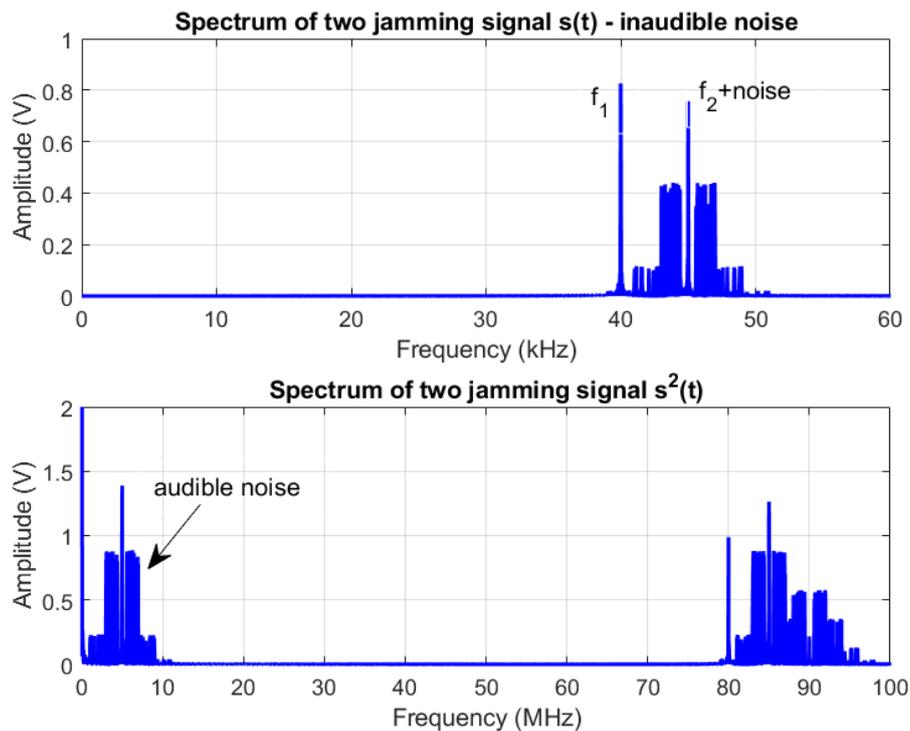


Figure 4. Two-channel frequency modulation ultrasonic jamming

5. CONCLUSION

This paper presents the possibility of using ultrasonic signals to jam recording devices, increasing the secrecy of ultrasonic jamming devices. An audio noise is generated in the recording device by the nonlinear effect in the microphone. This paper evaluates the effectiveness of different types of amplitude modulation and frequency modulation noise on the secrecy of the jamming device. The results show that the amplitude modulation noise will generate audible sound in the speaker of jammer and will expose the jammer and this type of modulation signal should not be used. Meanwhile, the frequency modulation noise has nonlinear effects but does not cause audible sound, which helps the jammer to ensure the confidentiality as well as the jamming effect.

REFERENCES

[1] R. Iijima, "Audio Hotspot Attack: An Attack on Voice Assistance Systems Using Directional Sound

Beams and its Feasibility," in *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2019.

[2] Hamby, W, "Ultimate sound pressure level decibel table," 2004.

[3] Nirupam Roy, Haitham Hassanieh and Romit Roy Choudhury, "BackDoor: Making Microphones Hear Inaudible Sounds," in *MobiSys '17: Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2017.

[4] Y. Chen, H. Li, S. Teng, "Wearable Microphone Jamming," 2020.

[5] H. O. Berktaç, "Possible exploitation of nonlinear acoustics in underwater transmitting applications," *Journal of Sound & Vibration*, vol. 2, no. 4, pp. 435-461, 1965.

[6] R. McArthur, "Intermodulation Fundamentals," N.p., n.d. Web: <http://www.sinctech.com/wpcontent/uploads/2012/10/final.pdf>.

ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Белоконь О.С.

*Инженерно-технический институт ГОУ
«Приднестровский государственный университет им. Шевченко Т.Г.»
Молдова, 3300, г. Тирасполь, ул. Восстания, 2а*

Яковенко Е.Г.

*Инженерно-технический институт ГОУ
«Приднестровский государственный университет им. Шевченко Т.Г.»
Молдова, 3300, г. Тирасполь, ул. Восстания, 2а*

INNOVATIONS IN EDUCATION

O.S. Belokon

*Engineering and Technical Institute of the State Educational Establishment
"Pridnestrovian State University named after. T.G. Shevchenko"
Moldova, 3300, Tiraspol, st. Vosstaniya, 2a*

E.G. Yakovenko

*Engineering and Technical Institute of the State Educational Establishment
"Pridnestrovian State University named after. T.G. Shevchenko"
Moldova, 3300, Tiraspol, st. Vosstaniya, 2a*

АННОТАЦИЯ

В данной статье акцентировано внимание на необходимость внедрения в образовательный процесс современных технологий.

Важным аспектом современных технологий является применение в учебном процессе «дистанционного обучения». Отражены положительные аспекты применения информационно-коммуникационных технологий в сфере образования. В статье отражены возможности, вытекающие при применении дистанционного формата обучения в современном образовательном процессе.

ABSTRACT

This article focuses on the need to introduce modern technologies into the educational process. An important aspect of modern technologies is the use of "distance learning" in the educational process, the positive aspects of the use of information and communication technologies in the field of education are reflected. The article reflects the possibilities arising from the use of distance learning in the modern educational process.

Ключевые слова: образование, «дистанционное обучение», задачи, возможности, эффективность, инновация

Keywords: education, "distance learning", tasks, opportunities, efficiency, innovation

Введение. Образование является неотъемлемым элементом современного мира, это один из главных жизненных процессов, в течении которого человек не только получает новые знания и умения, но и познает культурную составляющую общества вместе с её ценностями.

В силу быстрого развития науки, технологий и культуры, объем важных материалов для изучения растет с невероятной скоростью, что мотивирует человека на усовершенствование традиционной формы обучения. Для этого в современном мире, наряду со стандартными формами образовательного процесса, всё чаще стали применяться современные технологии.

Электронное обучение обеспечивает невысокую стоимость реализации и удобство, а также позволяет адаптировать курс под индивидуальные потребности слушателей и предлагать персонализированную практику. Электронное обучение, применяемое в качестве самостоятельного решения или в сочетании с другими методами, обладает огромным потенциалом, но, как и все формы обучения, оно

эффективно только тогда, когда ориентируется на реальные потребности и проектируется для их удовлетворения.

Во многих муниципальных образовательных учреждениях и частных школах реформируют образовательный процесс под современные потребности. Так, многочисленное число школ перешли на электронные журналы, ведение урока с применением интернет-технологий.

Применение информационно-коммуникационных технологий в сфере образования имеет множество положительных аспектов. Одним из них является уменьшение времени на обработку информации, а также повышение качества контроля и анализа материалов.

К положительным моментам также стоит отнести возможность быстрой систематизации документов и материалов, что значительно облегчает к ним доступ и даёт возможность сократить расход временного ресурса. Бумажные технологии отличаются не только своей эффективностью и простотой использования,

но и экологичностью по сравнению со стандартными методами образовательного процесса.

Информационно-коммуникационные технологии дают возможность подключить к образовательному процессу группы людей, которые по различным причинам испытывали затруднение в получении знаний путем традиционной формы обучения. Такой подход к обучению отчасти реализует концепцию инклюзивного образования, которая активно применяется в наше время.

Цель исследования. Применение дистанционных форм обучения в образовательных учреждениях.

Образовательные учреждения – это социальные институты, которые приобретают государственный статус системы образования в стране в качестве дошкольного, школьного, среднего специального, высшего и дополнительного образования. Социальная функция этих учреждений состоит в предоставлении образовательных услуг населению страны.

Основными задачами образовательных учреждений являются:

формирование общей культуры личности обучающихся на основе усвоения обязательного минимума содержания общеобразовательных программ;

создание основы для осознанного выбора и последующего освоения профессиональных образовательных программ;

обучение и воспитание в интересах личности, общества, государства, и создание благоприятных условий для разностороннего развития личности;

применение «дистанционного обучения».

В свою очередь термин «дистанционное обучение» означает такую организацию учебного процесса, при которой преподаватель разрабатывает учебную программу, главным образом базирующуюся на электронном обучении. Такая среда обучения характеризуется тем, что обучающийся в основном отдален от преподавателя в пространстве или во времени.

В отличие от различных форм заочного обучения, обучение на основе компьютерных телекоммуникаций обеспечивает оперативную обратную связь, заложенную как в самом учебном материале, так и непосредственную систематическую обратную связь с преподавателем. Кроме того, появляется возможность общения в сети с партнерами по изучаемому предмету [1].

Таким образом дистанционное обучение дает следующие возможности:

проходить обучение не покидая места жительства;

снизить стоимость обучения;

повысить уровень образовательного потенциала и качества образования;

получения тем категориям населения, которым оно ранее было недоступно в силу различных обстоятельств;

сохранения и развития единого образовательного пространства на территории страны и зарубежных стран, где проживает русскоязычное население.

Дистанционное образование в современном мире становится всё более значимым. Для получения максимально эффективного результата при таком методе преподавания необходимы образовательные платформы, которые бы покрывали все потребности пользователей.

Информационно-образовательная среда (ИОС) – это основанная на использовании компьютерной техники программно-телекоммуникационная среда, реализующая единым технологическим взаимосвязанным содержательным наполнением информационное обеспечение школьников, педагогов, администрацию учебного заведения и общественность.

Одним из важных элементов ИОС является мультимедиа, которая предоставляет возможность получения информации по средствам изображения и текста. Звук и видео в свою очередь обеспечивают такую форму презентации материала, которая помогает обучающимся быстрее и полнее его воспринимать.

Компьютерная обработка информации является, пожалуй, наиболее важным и нередко недостаточно используемым аспектом систем электронного обучения. Логика учебного процесса могут определять последовательность учебных мероприятий и делать обучение индивидуальным, а также приводить его в соответствии со способностями и целями каждого ученика [2].

Коммуникация с базами данных и другими пользователями, реализуется через сетевое соединение. Использование сетевых возможностей при электронном обучении открывает простор для формирования знаний.

Таким образом для решения задачи необходимо организовать такую информационную систему обучения, которая бы не только хранила и обрабатывала материалы, но и предоставляла возможность организации коммуникации между участниками образовательного процесса.

В связи с реалиями сегодняшнего дня актуальность дистанционного обучения заключается в том, что результаты общественного прогресса, сегодня концентрируются в информационной сфере. В настоящее время наступила эра информатики. Этап её развития в данный момент можно характеризовать как телекоммуникационный. Эта область общения, информации и знаний. Исходя из того, что профессиональные знания стареют очень быстро, необходимо их непрерывное совершенствование.

В начале третьего тысячелетия происходит переход от индустриального к информационному обществу, в котором знания и информация

становятся основными производительными силами. В информационном обществе существенным образом изменяется стратегия образования, причем важнейшей его чертой является широкое использование информационных технологий [4].

Основным показателем развития общества является эффективность использования ресурсов. В связи с этим возникает потребность в усовершенствовании существующих способов получения и обработки информации, введение инноваций в жизнь человека.

Понятие «инновация» как средство и процесс предполагают введение чего-либо нового. Применительно к педагогическому процессу в профессиональном образовании инновация означает введение нового в цели, содержание, методы и формы обучения, организации совместной деятельности преподавателя и ученика. Одним из видов инноваций в рамках организации образования является введение дистанционного образования.

Дистанционное обучение является одной из актуальных тем в современном мире. Одним из триггеров к развитию данного направления в образовании стала пандемия *COVID-19*. Подавляющему большинству учебных заведений пришлось прибегнуть к альтернативной форме обучения.

Одним из преимуществ электронного образования является экономичность. Это выражается, например, высокой стоимостью транспортных услуг, питание. Поездки на учебу требуют значительных материальных затрат обучающихся, проживающих далеко от учебного заведения.

Материал и методы исследования. Исследование существующих способов применения дистанционного обучения связано с необходимостью внедрения в инженерно-техническом институте информационной системы дистанционного обучения. Для этого были изучены существующие аналоги программных продуктов, что позволило обнаружить достоинства и недостатки подобного ПО, а также определить и предупредить ошибки, возникающие в подобных системах, еще на ранних этапах.

При исследовании существующих программных продуктов были найдены аналоги программного продукта. Наиболее популярная в Приднестровье образовательная платформа *Moodle* «Электронная школа Приднестровья».

Moodle – обучающая среда, база, которая с помощью настройки, дополнительных программ и физических носителей информации превращается в систему. Электронная школа Приднестровья создана на основе среды *Moodle* и оснащена дополнительными плагинами, которые моделирует систему.

Главное преимущество электронной школы Приднестровья – бесплатное распространение. Данная система предоставляет все функции, без

ежемесячной подписки или лицензии и не имеет в себе систем дополнительной оплаты.

Еще одним преимуществом данного решения является систематизирование всех школ республики на единой образовательной платформе. Такой подход дает всеобщую стандартизацию образовательного процесса в рамках дистанционного обучения. Благодаря этому переход ученика в другое образовательное учреждение не сопровождается изучением новой системы и дает возможность быстрее влиться в учебный процесс.

Также электронная школа Приднестровья осуществляет поддержку большого количества типа файлов, которые могут быть использованы для демонстрации информации. Помимо файлов, эта система предоставляет возможность проверки качества усвоения материала по средствам тестирования. Следует также отметить гибкую настройку тестов, преподаватель может установить ограничение по времени доступа к тесту, проверить его самостоятельно или же назначить эту функцию на систему.

Среди недостатков стоит отметить частые перебои системы при большой загруженности сайта. Большинство пользователей сталкивались с проблемой при отправке ответов на тестовые задания, система не сохраняла результаты и не давала доступ к повторному прохождению.

Еще одним недостатком данного сервиса является сложный для понимания интерфейс. Расположение вкладок и переходов является интуитивно непонятным, что в свою очередь увеличивает время на обучение и может стать проблемой для неопытных пользователей.

На сегодняшний день электронная школа Приднестровья является не единственным сервисом онлайн обучения.

Также получила популярность среди пользователей в последнее время информационная система дистанционного образования *Google Classroom* – сервис для онлайн-обучения, который позволяет создавать курсы, тестировать обучающихся. Компании *Google* собрала в одном сервисе несколько своих инструментов. Среди них, диск для хранения файлов, *Google Docs* для публикации текстовых лекций, презентации, опросы. Для работы необходимо создать аккаунт в *Google*. Сразу после предоставляется возможность добавить обучающихся, создать курс и наполнить его необходимыми материалами

Результаты исследования и их обсуждение. Дистанционное обучение предоставляет ряд возможностей:

Приводит к повышению экономической эффективности образования. С одной стороны, оно позволяет снизить часть расходов традиционных учебных заведений, оптимизировать и улучшить управление образовательным процессом, повысить уровень оплаты труда преподавателей и специалистов, создающих учебные ресурсы. С другой стороны, для потребителя, уменьшаются ограничения финансового характера, как в

следствие снижения затрат учебной организации, так и в следствие снижения затрат обучаемого.

Дает возможность реализовать индивидуальную траекторию обучения в соответствии с когнитивными особенностями личности обучающегося, его знаниями и имеющейся подготовкой, наличием времени для обучения.

Может способствовать повышению качества учебного процесса. Как правило, внедрение информационных технологий, сопровождается повышением качества курсов и программ учебных заведений, что связано с тем, что курсы и программы создаются при участии целой команды специалистов.

Способствует развитию новых образовательных концепций и новых моделей преподавания. В основе таких моделей и концепций находится индивидуально-ориентированное обучение, с ориентацией на обучаемого, на его индивидуальные особенности. При этом обучение становится активным, ориентированным на практическую деятельность.

Дает возможность всем участникам учебного процесса развиваться согласно с требованиями времени. И преподаватели, и обучаемые в системе электронного обучения развивают свои знания, умения и навыки в соответствии с новейшими технологиями и стандартами. Кроме того, использование электронных технологий позволяет быстро актуализировать содержание учебных материалов и оперативно обновлять форму их представления [6].

Предоставляет обучающимся потенциально равные возможности обучения. Вне зависимости от качества преподавания в конкретном учебном заведении, обучающийся может получать учебную информацию и заниматься практически в любом оборудованном месте.

Вывод. Дистанционное образование покрывает множество проблем, которые возникают при традиционной форме обучения. Данный подход имеет ряд преимуществ и дает возможность повысить эффективность учебного процесса в системе образования.

В настоящее время дистанционное обучение является одним из перспективных направлений в образовании. Для организации дистанционного обучения многие образовательные учреждения организуют учебные порталы. Они представляют собой ресурсы, которые содержат учебные материалы, задания для самостоятельного выполнения, тесты для самопроверки, обучающие подсистемы и множество других полезных ресурсов.

На сегодняшний день применение информационно-коммуникационных технологий в сфере образования получило широкое распространение среди различных видов образовательной деятельности. Так, не только частные образовательные учреждения, но и муниципальные, используют электронные

журналы оценок, а также ведут уроки с применением интернет-технологий [5].

Многие родители охотно обращаются к дистанционному обучению в школе, чтобы не допустить пропусков по учебе, отставания, так как их дети в силу тех или иных обстоятельств иногда не могут посещать все школьные занятия. При таком подходе специальная учебная среда позволяет педагогу прокомментировать каждую работу обучаемого, дать рекомендации по исправлению ошибок, работать с каждым до полного решения учебной задачи.

Дистанционное обучение влияет на психоэмоциональное состояние учеников. Отсутствие непосредственного контакта между обучающимся и преподавателем снижает степень личного влияния педагога на эмоциональное окрашивание получаемых знаний. Также снимается психологическое воздействие, которое обусловлено воздействием класса или успеваемости ученика в рамках обучения предмету.

Внедрение дистанционного обучения набирает обороты с каждым годом, и это говорит о том, что использование современных технологий и научных достижений в сфере образования, является эффективным и удобным методом обучения, который при правильной методике, способен вывести всю систему образования на новый, современный уровень.

Инновационные формы организации образовательного процесса не только облегчают усвоение учебного материала, но и предоставляют новые возможности для развития творческих способностей обучаемых, постоянно стимулируя их личностный рост. Также дистанционные технологии помогают преподавателю повысить качество образования, сформировать универсальные учебные действия в современной цифровой коммуникационной среде [3].

Имея в своей основе *online*-технологии и виртуальное пространство, дистанционное обучение сделало образование доступным большому числу людей, разделенных географическим расстоянием или по другой причине не имеющих возможности очного обучения. Следует отметить, что виртуальное пространство предоставляет дистанционному обучению абсолютно неограниченный потенциал благодаря возможностям сети *Internet*.

Компьютерная грамотность уже давно является ключевым фактором в современном образовательном процессе. Обучающийся должен уметь пользоваться удаленными программами, электронной почтой, и другими сетевыми инструментами, программами дистанционного обучения.

Со своей стороны, увеличение пропускной способности сетей делает ее более актуальной с использованием методов видеоконференций. Развитие рассматривается не только в качестве дополнительной услуги для клиента-ученика. Заинтересованы в этом и сами учебные заведения, а также государство, которое ищет способы

увеличить количество учеников, стремясь при этом сократить сопутствующие с этим расходы.

Список литературы

Андреев А.А. Дистанционное обучение: сущность, технология, организация / А.А. Андреев, В.И. Солдаткин. – М.: МЭСИ, 1999. – 196 с.

Болкунов И.А. Электронное обучение: проблемы, перспективы, задачи / И.А. Болкунов // Таврический научный обозреватель. – 2016. – №11(16). – С. 128-133

3. Морев, И. А. Образовательные информационные технологии. В 4 ч. Ч.1 :Обучение

/ И. А. Морев. – В.: Дальневосточного университет, 2004. – 162 с.

Рулиене Л.Н. Дистанционное обучение: сущность, проблемы, перспективы / Улан-Удэ: Бурятский университет, 2010. – 272 с.

5. Дистанционное обучение: будущее развития образования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://izd-mn.com/PDF/13MNNPU19.pdf>.

6. Дистанционное обучение в школе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yandex.ru/promo/education/distancionnoe-obuchenie-shkola-metodicheskie-rekomendacii>.

УДК 656.212.073.437:656.212

ГРНТИ 73.29.61

К ВОПРОСУ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННО-СПРАВОЧНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК ОПАСНЫХ ГРУЗОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУЗОТРАНСПОРТИСТАМИ

Калушин Александр Александрович

к.э.н., доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), кафедра «Технологии грузовой и коммерческой работы, станции и узлы» г. Самара

ABSTRACT

The article discusses the results of a study on the development of information and reference resources in the organization of transportation of dangerous goods in the conditions of digitalization of interaction with shippers. The analysis of the corresponding connections of the elements of the system under consideration is carried out. The analysis of the available technical and operational-technological documents, as well as the main regulatory legal acts in the field of relations between the railway station, owners of non-public tracks, customers and users of railway transport in the organization of transportation of dangerous goods, allowed us to draw conclusions about the features of such interaction and formulate the content of mandatory works (elements, procedures) in the transportation process. A possible architecture of the application is proposed, which can be used as an information and training one (it should provide for the issuance of certain requested information to the question of interest in the form of a certificate, that is, it can be used as an information and training system), and confirming the correct performance by the sender of all necessary actions when organizing the transportation of dangerous goods.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются результаты исследования по вопросу развития информационно-справочных ресурсов при организации перевозок опасных грузов в условиях цифровизации взаимодействия с грузоотправителями. Выполнен анализ соответствующих связей элементов рассматриваемой системы. Анализ имеющихся технических и эксплуатационно-технологических документов, а также основных нормативно-правовых актов в сфере взаимоотношений железнодорожной станции, собственников путей необщего пользования, клиентов и пользователей железнодорожного транспорта в вопросах организации перевозок опасных грузов, позволил сделать выводы об особенностях такого взаимодействия и сформулировать содержание обязательных работ (элементов, процедур) в перевозочном процессе. Предлагается возможная архитектура приложения, которое может быть использовано как информационно-обучающая (должна предусматривать выдачу определенной запрашиваемой информации на интересующий вопрос в виде справки, то есть может использоваться как информационно-обучающая система), так и подтверждающая корректное совершение отправителем всех необходимых действий при организации перевозок опасных грузов.

Keywords: integrated interaction system, dangerous goods, safety, information and training system, communication elements, the current state of the system, the result of functioning, management decisions, interaction

Ключевые слова: интегрированная система взаимодействия, опасные грузы, безопасность, информационно-обучающая система, связи элементов, текущее состояние системы, результат функционирования, управленческие решения, взаимодействие

Развитие цифровой трансформации работы услуг является одним из направлений железнодорожного транспорта и пользователей трансформации и развития [1-5].

Приоритетами являются: развитие аналитики и технологий искусственного интеллекта (AI), робототехника и автоматизация технологических процессов, цифровизация бизнес-процессов и др.

Комплекс цифровизации бизнес-процессов и автоматизации сопутствующего ПО направлен на формирование и развитие цифровой системы, которая позволила бы управлять полным жизненным циклом работы подвижного состава, отслеживать результаты для оперативной отчетности на всем пути движения вагонов (отправление и погрузка, сортировка, прибытие и выгрузка), анализировать и визуализировать имеющиеся данные (в виде создания информационных панелей, графиков или отчетов), совершенствовать и развивать CRM систему в целях дальнейшей автоматизации применяющихся стратегий взаимодействия с клиентами [6] и т.д.

Для ОАО «РЖД» это, прежде всего, интегрированная система взаимодействия с клиентами (грузовые перевозки), в том числе соответствующая платформа по управлению клиентским опытом, в том числе на основе активно внедряемых технологий цифровизации в грузовой работе, например, технология «Цифровой приемосдатчик» [7, 8].

Такой подход к развитию отрасли, в определенной мере, оказывают влияние на эффективность и безопасность работы транспортного комплекса. Особенно, если речь идет об перевозочном процессе опасных грузов.

В [9] были рассмотрены особенности взаимодействия станций примыкания ОАО «РЖД» и путей необщего пользования российских НПЗ, и сформулирован вывод об ограниченном количестве таких комплексов, а, следовательно, ограниченном

количестве подобных пользователей услуг по перевозке опасных грузов. Было бы перспективным использование дополнительного приложения в «личном кабинете» пользователя, которое позволяло бы повысить эффективность контроля перевозочного процесса по опасным грузам.

В качестве такого предложения по совершенствованию системы работы с вагонами, грузоотправителями и получателями, может быть рассмотрено мобильное приложение (ПО), которое позволит, с одной стороны использоваться работниками, связанными с перевозкой опасных грузов, как информационно-справочное информационное табло, с другой стороны, при невыполнении каких-либо параметров пользователь, например, видит, что один из параметров горит красным цветом и груз или вагон не может быть принят и ему необходимо сосредоточить на данном параметре свои действия и усилия для приведения параметра в нормальное (допустимое для осуществления перевозки) состояние [10].

Таким образом, развитие информационно-справочных ресурсов при организации перевозочного процесса опасных грузов в условиях цифровизации взаимодействия с грузоотправителями и получателями укладывается в общую концепцию развития и совершенствования цифровизации бизнес-процессов, а также CRM систем.

На основании проведенного анализа в результате выполненных исследований текущее состояние системы выглядит следующим образом, рис. 1.

Связи элементов рассматриваемой системы представлены на рис. 2

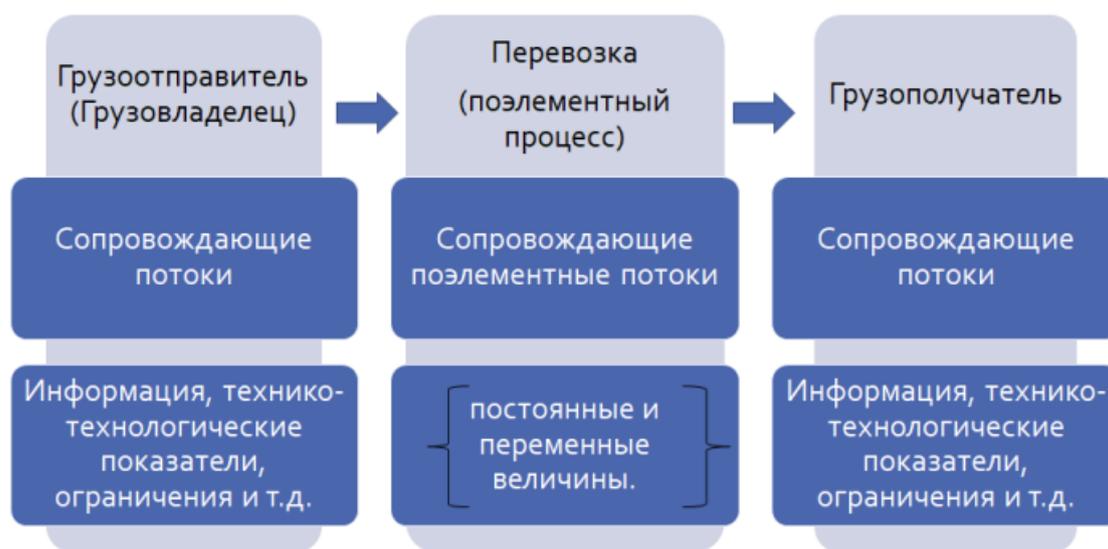


Рис. 1 - Текущее состояние системы

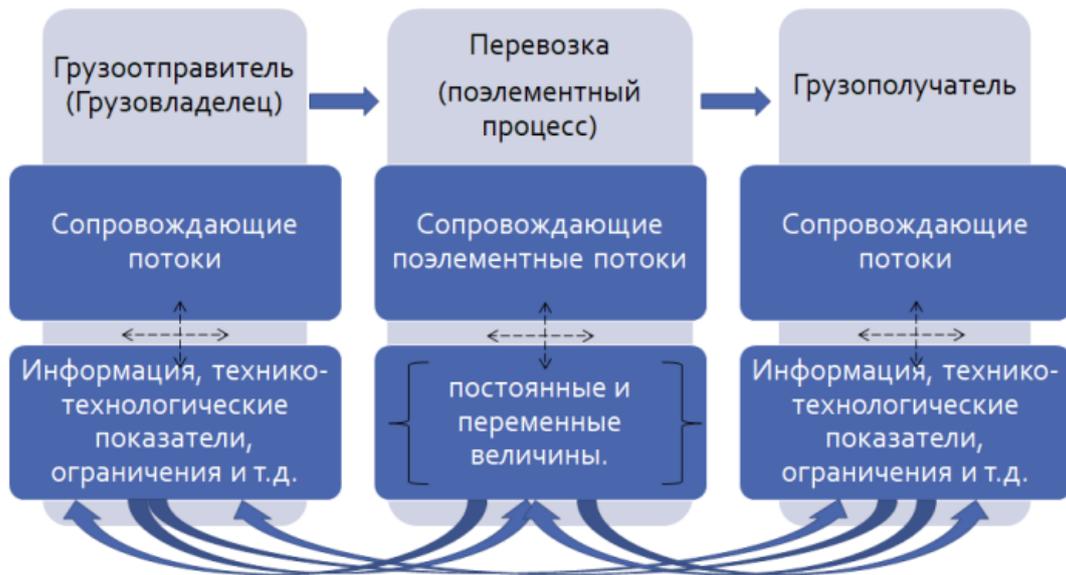


Рис. 2 – Связи элементов системы

Видимый результат функционирования системы будет выражаться двухсторонним эффектом, рис. 3.

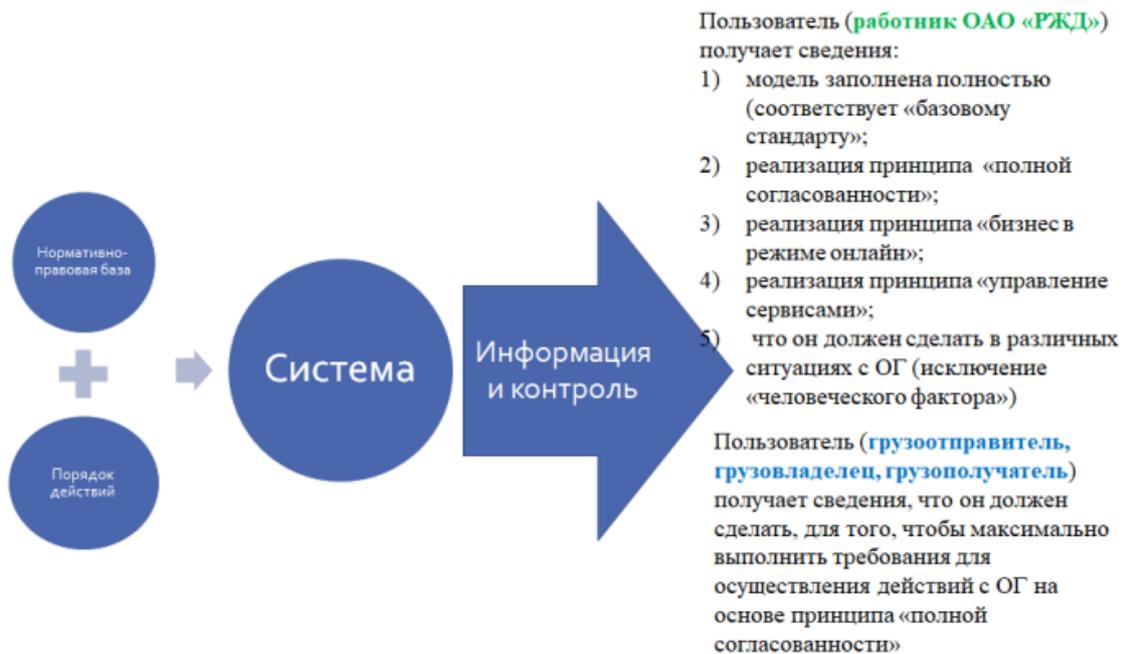


Рис. 3 - Результат

На рис. 4 представлена возможная архитектура приложения, которое позволит работать с опасными грузами и как обучающая система и как система допуска к перевозке.

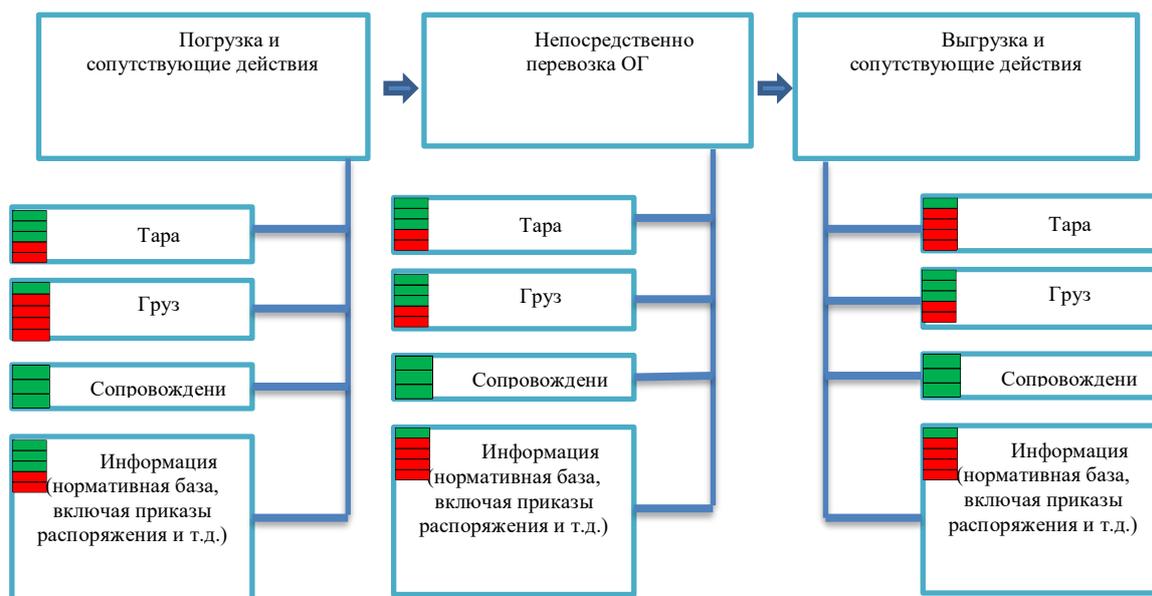


Рис. 4 - Возможная архитектура приложения

Таким образом, поэлементные массивы, а точнее интерфейс пользователя с их окончательным видом по результатам действий будет иметь 2 варианта отображения корректности событий:

элемент (операция, комплекс работ и т.д.):

- выполнено (корректно выполнено) – «зеленый индикатор отображения результата действий»;

- не выполнено (не корректно выполнено) – «красный индикатор отображения результата действий».

Использование контекстного меню позволит пользователю в дальнейшем выполнить выбор необходимого действия над выбранным объектом (например, по таре или грузу, или нормативно-правовому содержанию). Система может быть использована как информационно-обучающая (должна предусматривать выдачу определенной запрашиваемой информации на интересующий вопрос в виде справки, то есть может использоваться как информационно-обучающая система), так и подтверждающая совершение отправителем всех действий при организации перевозок опасных грузов.

Используя в дальнейшем инструменты анализа больших данных, можно будет принимать более эффективные управленческие решения, основываясь при этом на информации, выводимой на интерфейс пользователя (количество и содержание цветowych элементов «зеленый/красный»), выстраивать максимально персонализированную коммуникацию с клиентами, формируя актуальные предложения. То есть пользователь в режиме он-лайн видит, какой из параметров не выполнен и соответственно может корректировать свои действия. При этом количество окон может зависеть от схемы данных между различными массивами. Проработка детального содержания массивов данных требует дальнейшего исследования и сопоставления

параметров имеющейся нормативно-правовой и технико-технологической документации.

Система должна предусматривать взаимодействие с системами ЕАСАПР, ЭТРАН, АСУ ПРАВО, Яндекс документы, он-лайн сервисом «RZD Cargo» и Электронной Торговой Площадкой Транспортных Услуг (ЭТП ТУ). Такое взаимодействие может дать полностью прозрачную систему безопасных и эффективных перевозок опасных грузов.

Список литературы

1 «Об утверждении долгосрочной программы развития открытого акционерного общества "Российские железные дороги" до 2025 года (с изменениями на 13 октября 2022 года), распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 года № 466-р [Текст] – URL: <https://docs.cntd.ru/document/553927831>

2 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» (с изменениями на 21 июля 2020 года), Указ Президента Российской Федерации [Текст] – URL: <https://docs.cntd.ru/document/557309575>

3 «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года» (с изменениями на 13 апреля 2022 года), утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2018 года № 2101-р [Текст] – URL: <https://docs.cntd.ru/document/551365461>

4 «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года», утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р [Текст] – URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161>

5 Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства

Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877- [Текст] – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/1/1010?ysclid=la52q43we6182816371>

6 ОАО «РЖД» запустит CRM-систему для работы с грузоотправителями до конца 2020 года [Текст] – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9354/page/10406>

7 «На Куйбышевской железной дороге запущен в промышленную эксплуатацию проект «Цифровой приемосдатчик» [Текст] – URL: <https://kbsh.rzd.ru/ru/3673/page/104069>

8 Гулый И.М. Цифровой приемосдатчик — технология приема вагонов к перевозке, внедряемая в рамках Стратегии Цифровой Трансформации Российских Железных Дорог [Текст] – URL: https://ecsn.ru/files/pdf/202206/202206_65.pdf

9 А.А. Калущин, В.И. Солдаткин. Особенности взаимодействия станций примыкания ОАО «РЖД» и путей необщего пользования российских НПЗ. Наука и образование транспорту: материалы XI Международной научно-практической конференции (2018, Самара). Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту», 2018 г. Том 1 [Текст] / редкол.: Д.В. Железнов [и др.] - Самара: СамГУПС, 2018. - С. 86-91.

10 Калущин А.А. Перевозочный процесс опасных грузов в условиях цифровизации взаимодействия с грузоотправителями. Наука и образование транспорту: материалы XV Международной научно-практической конференции 10-11 ноября 2022 г. Том 1 [Текст] - Самара: СамГУПС 2022. - С. 154-156

УДК 614.841.45:621.316.9

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ОТ АВАРИЙ И ПОЖАРОВ

Мельников Владимир Семенович
кандидат технических наук

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.106.1778

АННОТАЦИЯ

Электроустановки жилых, общественных, производственных зданий (сооружений) для обеспечения безопасности выполняют с активной защитой распределительных и групповых цепей. Более широкий круг задач решают системы противопожарной и противоаварийной защиты. Координация действий средств пожарной (противоаварийной) автоматики и автоматики электроустановок позволяет существенно повысить общую эффективность защиты и своевременно реагировать на отклонение электрических и неэлектрических показателей. Универсальная технология при этом заключается в том, что в качестве приборов управления используются штатные устройства дифференциального тока. Во многих случаях такой приём реализуется без изменений типовых проектов электроснабжения. В статье приведены результаты испытаний ряда вариантов активной защиты при моделировании аварийных режимов. В том числе рассмотрен случай эксплуатации электроустановок в газифицированных зданиях и проверено действие защиты в случае утечки. Также показаны противоаварийные варианты, которые применяются при протечке воды, при повреждении защитного, нейтрального и фазных проводников. Подтверждена работоспособность таких сборок с устройствами дифференциального тока как дифференциальные диполи, бидиполи, блоки, и денонсаторы. Адаптацию предлагаемого решения во всех системах помощи человеку «Умного дома» и «Безопасного производства» предлагается обеспечивать при свободном выборе как проводных, так и радиоканальных схем управления.

ABSTRACT

Electrical installations of residential, public, industrial buildings (structures) to ensure safety are performed with active protection of distribution and group circuits. A wider range of tasks is solved by fire and emergency protection systems. Coordination of the actions of fire (emergency) automation and automation of electrical installations can significantly increase the overall protection efficiency and respond in a timely manner to the deviation of electrical and non-electrical indicators. In this case, the universal technology lies in the fact that standard differential current devices are used as control devices. In many cases, this technique is implemented without changing typical power supply projects. The article presents the results of testing a number of options for active protection in the simulation of emergency modes. In particular, the case of operation of electrical installations in gasified buildings was considered and the operation of protection in the event of a leak was checked. Also shown are emergency options that are used in case of water leakage, in case of damage to the protective, neutral and phase conductors. The operability of such assemblies with differential current devices as differential dipoles, bidipoles, blocks, and denonsators has been confirmed. The adaptation of the proposed solution in all human assistance systems of "Smart Home" and "Safe Production" is proposed to be provided with a free choice of both wired and radio channel control schemes.

Ключевые слова: Пожарная безопасность, электроустановка, активная защита

Keywords: Fire safety, electrical installation, active protection

ВВЕДЕНИЕ

История разработок устройств дифференциального тока хорошо известна с начала 20-го века [1]. Тогда же было сформулировано их первоначальное назначение. Например, Лев Петрович Подольский в 1924 году предложил «Устройство для защиты трёхфазных установок от однофазных замыканий на землю» [2]. Аналогичные идеи с дифференциальными реле реализуются и сегодня. Вместе с тем практика применения за сто лет охватила более широкий круг задач. И целью настоящей публикации было показать последние достижения, связанные с усилением роли устройств дифференциального тока. В рамках работы намечено продемонстрировать переход к универсальному решению, общие приёмы построения защиты и дать оценку её характеристик на основании испытаний.

В связи с отличием одновременно действующих нормативных документов для взаимопонимания специалистов обозначения и термины по рассматриваемой теме сведены в табл. 1, где разные наименования отнесены к двум подгруппам. Такое объединение охватывает большинство серийно выпускаемых двух-, трёх- и четырёхполюсных моделей промышленного и бытового назначения, а также специальные конструкции с дифференциальными датчиками и реле. В данном случае важно, что они предназначены включать, проводить и отключать токи при нормальных условиях и автоматически отключать электрическую цепь, когда дифференциальный ток достигает заданного значения, т.е. соответствуют определению для устройств дифференциального тока по п. 20.86 ГОСТ 30331.1-2013.

Таблица 1

Устройства дифференциального тока

Обозначения	Наименования	Нормативный документ
УДТ	Устройство дифференциального тока	ГОСТ 30331.1–2013 п. 20.86
ДВ	Дифференциальный выключатель (диф. выключатель)	
QD	- "-", буквенный код	ГОСТ 2.710-81
ВДТ	автоматический выключатель, управляемый дифференциальным током, без встроенной защиты от сверхтоков	ГОСТ IEC 61009-1-2020 п. 3.3.6
RCCB	residual current operated circuit-breaker without integral overcurrent protection	
УЗО	устройство защитного отключения	ГОСТ IEC/TR 60755-2017 п. 3.3.1, 3.3.7
RCD	residual current device	
ДА	Дифференциальный автомат (дифавтомат)	
QFD	- "-", буквенный код	ГОСТ 2.710-81
АВДТ	автоматический выключатель, управляемый дифференциальным током, со встроенной защитой от сверхтока	ГОСТ IEC 61009-1-2020 п. 3.3.7
RCBO	residual current operated circuit-breaker with integral overcurrent protection	

Принцип построения универсальной защиты электроустановок заключается в применении устройств дифференциального тока в качестве приборов управления, инициирование отключения которых выполняется за счёт нарушения баланса токов дифференциальных датчиков при широком выборе источников сигналов об опасности [3].

Существует ряд разработок, которые полезно учитывать, как аналоги, прототипы и примеры универсальной защиты. Среди них тоже встречаются решения с обычными (серийными) устройствами дифференциального тока и с модернизированными моделями, существенно отличающимися от серийных. Техническое и экономическое обоснования однозначно окажутся на стороне первых, поэтому они и будут рассмотрены в рамках настоящей работы. Таким

образом конструкции устройств дифференциального тока останутся неизменными, а новые технические результаты получатся за счёт изменения и дополнения схем соединения. Например, обычно в устройствах эксплуатационного контроля (по п. 3.3.21 ГОСТ IEC 61008-1-2020 и п. 3.3.22 ГОСТ IEC 61009-1-2020) для отключения используется токоограничивающий резистор, которым по диагонали замыкают цепь между входом и выходом любых двух полюсов. Аналогично устроены и действуют тестеры УЗО, однако в них вместо резистора иногда используется конденсатор [4]. Другая схема для управления может содержать источник тока, который включается между входом и выходом одного полюса [5]. Само же управление выполняют непосредственно путём замыкания

контактов в цепи управления или дистанционно с помощью радиореле [6]. В случае отсутствия защитного проводника кроме радиореле дистанционное управление устройством дифференциального тока может осуществляться передатчиком и приёмником импульсов по линии электропитания [7].

Некоторые схемы с устройствами дифференциального тока удобно представить в соответствии с возможностями расширения перечня контролируемых электрических показателей. Так, известны сборки, позволяющие автоматически отключать электропитание при повреждении проводников (обрыве или появлении больших переходных сопротивлений), они содержат либо штатное трёхполюсное устройство дифференциального тока и дополнительные резисторы [8], либо четырёхполюсное устройство и дополнительные конденсаторы [9]. Схема, позволяющая контролировать обрыв нейтрального проводника, может быть реализована с обычным двухполюсным устройством дифференциального тока и вспомогательным пороговым элементом, соединяющим нейтральный и защитный проводники [10]. Также двухполюсное устройство способно ограничивать максимальное напряжение, если к диагонали (вход-выход) присоединён варистор [11] или блок из трёх варисторов [12].

Перечень контролируемых неэлектрических показателей в свою очередь расширяют решения, связывающие штатные устройства дифференциального тока и соответствующие датчики. Если необходимо контролировать температуру, то такими датчиками могут быть термистор или термореле, которые через токоограничивающий резистор замыкают цепь между фазным и защитным проводниками [13, 14]. Если необходимо контролировать уровень токопроводящей жидкости, то с фазным и защитным проводниками соединяют электроды, и устройство дифференциального тока отключается, когда эти электроды затопливаются [15].

Приведённые приёмы построения универсальной защиты можно обобщить с помощью схемы на рис. 1. Здесь центральное место занимает штатное устройство дифференциального тока, поскольку при обнаружении признаков опасности используется его способность отключать электрическую цепь (электропитание). Сигналы для такого отключения формируют датчики или контролёры электрических и неэлектрических показателей. Конкретные конструкции и способы управления по каждому варианту представлены автором настоящей статьи в патентах РФ № 2454258, 2737951, 2763031, 133746, 192110, 197833, 198896, 198910, 199982, 207004, 207371, 210811. Вопросы координации со средствами пожарной автоматики подробно разобраны в монографии [3]. При развитии темы особое внимание уделено безопасности электроустановок в многоквартирных жилых домах, где используется газ, поскольку источником зажигания во взрывоопасной среде чаще всего становится электрооборудование. Также противоаварийные схемы предложены на случай протечки воды для контроля вдоль трубопроводов и контроля отдельных электроприборов (стиральных и посудомоечных машин, водонагревателей, насосов), при эксплуатации которых случаются как протечки, так и обрывы защитного проводника. Расширенный перечень компонентов, для которых возможно своевременное отключение при перегреве, теперь включает кабельные трассы, розетки, вилки, распределительные коробки, корпуса и другие части электрооборудования. При этом кроме температуры предлагается контролировать состав воздуха на наличие в нём продуктов пиролиза изоляции или продуктов деструкции термоиндикаторных красок, также рекомендуется контролировать излучения с помощью инфракрасных камер и т.д. В общем показано, что для построения универсальной защиты можно использовать любые контактные и бесконтактные средства контроля.



Рисунок 1 - Универсальная защита электроустановок от аварий и пожаров.

Важно отметить полное соответствие применения универсальной защиты требованиям нормативных правовых актов. Так, в п. 4 Статьи 82 «Технического регламента...» (Федерального закона 123-ФЗ от 22.07.2008 ред. от 14.07.2022) указано, что линии электроснабжения помещений зданий и сооружений должны иметь устройства защитного отключения, предотвращающие возникновение пожара. Там же в п. 4 Статьи 83 сказано, что автоматические установки пожаротушения и пожарной сигнализации должны обеспечивать подачу сигналов на технические средства управления инженерным оборудованием. Система электроснабжения относится к инженерному оборудованию согласно п. 15 а) «Положения о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (Постановлению правительства РФ от 16.02.2008 N 87 с изменениями на 20.04.2022), где в п. 26 также указано, что в проектах Раздел 9 "Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности" должен содержать описание и обоснование взаимодействия оборудования противопожарной защиты с инженерными системами зданий. Кроме того, приведённые требования отражены в нормативных документах, например комплекс сводов правил систем противопожарной защиты (СП 484.1311500.2020, СП 485.1311500.2020, СП 486.1311500.2020) предусматривает оборудование пожарной сигнализацией жилых многоквартирных зданий независимо от площади и как минимум оснащение автономными пожарными извещателями жилых многоквартирных зданий. Применение устройств дифференциального тока предусмотрено сводом правил СП 256.1325800.2016 и ГОСТ Р 50571.4.41—2022. Таким образом устройства дифференциального тока и средства пожарной (противоаварийной) автоматики обосновано относятся к штатным

компонентам систем помощи человеку «Умного дома» и «Безопасного производства». Их применение не требует никаких дополнительных затрат, поэтому организация универсальной защиты связана в основном с координацией работы датчиков и приборов управления, что оказывается возможным без изменения типовых проектов электроснабжения. Достаточно в технических заданиях на проектирование и в проектах сигнализаций учитывать требование о взаимодействии оборудования противопожарной (противоаварийной) защиты с инженерными системами зданий. Тогда универсальная защита позволит предотвратить развитие опасных режимов за счёт автоматического выполнения следующих первоочередных действий:

- блокировки электропитания (одного из основных источников опасности),
- своевременного отключения источника зажигания в горючей или взрывоопасной среде,
- прекращения действия источника зажигания и ограничения распространения пожара за пределы очага, в том числе при отсутствии автоматических установок пожаротушения или при ограниченном запасе огнетушащего вещества для автономных установок пожаротушения,
- предотвращения повторного возгорания,
- минимизации повреждений частей электроустановки,
- обеспечения электробезопасности (защиты от поражения электрическим током людей, в том числе пожарных и спасателей).

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные результаты настоящей работы получены при моделировании на стендах аварийных режимов эксплуатации оборудования в условиях максимально приближенных к реальным. Для этого выполняли сборки с применением

серийных изделий и материалов, а источники питания и тестовую нагрузку выбирали с характеристиками переменного тока 50 Гц, соответствующими номинальному напряжению системы 230/400 В. Пример одной из сборок приведён на рис. 2, 3.

Задача, которую решает данная защита с устройством дифференциального тока 1, заключается в непрерывном контроле показателей электропитания реле-регистратором 2 и в отключении питания при недопустимых отклонениях. Показатели питания от ввода 3 предварительно перед тестами устанавливаются по вольтамперметрам 4, причём автоматические выключатели 5 позволяют независимо моделировать обрыв нейтрального и фазных проводников, а подключение автотрансформатора через клеммы 6 даёт возможность регулировать напряжение для одной из фаз. Реле-регистратор 2 программируется через смартфон, и его работа сопровождается циклической записью через заданные интервалы времени токов, напряжений,

сдвигов фаз и частоты питания нагрузки $R_{Н1} \dots R_{Н3}$. Контроль токов по фазам выполняется через трансформаторы тока $T_1 \dots T_3$. Сигнал управления реле-регистратор 2 формирует с помощью контактов, которые замыкают на землю цепь управления с кнопкой блокировки 7 (K_1), токоограничивающим резистором 8 (R_1) и проводником 9. Помимо совместной работы устройств 1 и 2 сохраняется обычная возможность реагирования устройства дифференциального тока 1 при замыканиях на землю, кроме того предусмотрено отключение при замыкании цепи управления с помощью датчиков неэлектрических показателей, например минитермостатом 20. Важно то, что при необходимой длине проводника 9 и кабеля 10 регистратор 2 может быть расположен не в щите а удалённо от устройства дифференциального тока 1, т.е. непосредственно вблизи нагрузки $R_{Н1} \dots R_{Н3}$. Благодаря этому под контролем оказываются все повреждения, которые возникнут до места подключения нагрузки.

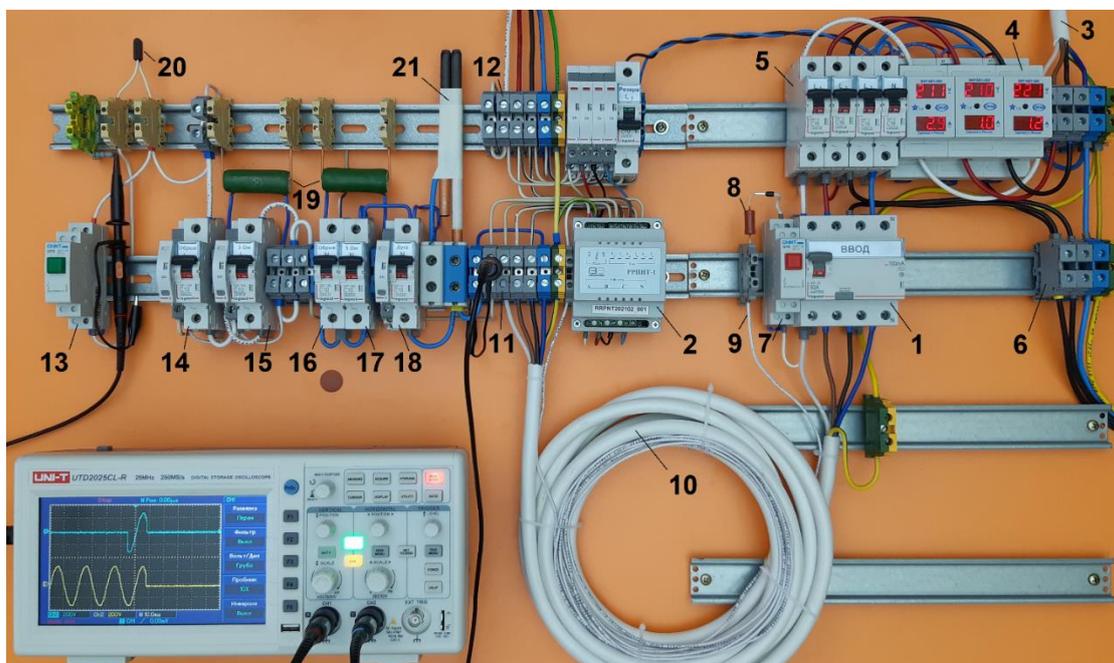


Рисунок 2 - Стенд для испытаний: 1 – ВДТ (100 мА), 2 - реле-регистратор РРПНТ-1 ООО "МЭЛЗ", 3 – ввод 400 В, 4 – вольтамперметры, 5 – автоматические выключатели фазных и нейтрального проводников, 6 – клеммы подключения автотрансформатора, 7 – кнопка блокировки линии управления, 8 – токоограничивающий резистор линии управления, 9 – проводник линии управления, 10 – кабель, 11 – клеммы входа реле-регистратора, 12 – клеммы подключения нагрузки, 13 – кнопка замыкания фазного и защитного проводника, 14, 15 – автоматические выключатели с вспомогательными контактами для моделирования обрыва фазного проводника и повышения сопротивления, 16, 17 - автоматические выключатели для моделирования обрыва нейтрального проводника и повышения сопротивления, 18 - автоматический выключатель с вспомогательным контактом для моделирования дугового пробоя, 19 – резисторы, 20 – минитермостат (Sang Mao B-1009N, 60°C, 2 А, NO), 21 – свеча П.Н. Яблочкова.

осуществлялся до температуры 450°C. Ранее опубликована подробная информация о проверке действия универсальной защиты в составе с термостатами (термореле), пожарными извещателями и системами сигнализации [3]. Поэтому дополнения программы испытаний касаются некоторых новых схем контроля электрических показателей и защиты в составе с сигнализациями утечки газа, протечки воды, звука и т.д. Кратко рассмотрим некоторые из них.

Защита при утечке газа.

Система автономного контроля загазованности СГК-2-Б-СО+СН с запорным клапаном КЗГЭМ-БМ-15 ООО ПКФ «СарГазКом», с основным и резервным источниками питания применялась при моделировании утечки природного газа (метана – CH_4) и выделении оксида углерода (СО) в соответствии с рекомендациями изготовителя, указанными в руководстве по

эксплуатации АФТЦ. 421459.001-17 РЭ. В качестве сигнала для отключения электропитания в случае обнаружения утечки газа использован импульс управления клапана с напряжением 32...40 В. В системе этот сигнал рассчитан на нагрузку не менее 5 Ом, а сопротивление катушки электромагнита клапана составляет 16 ± 2 Ом. Схема соединения с устройством дифференциального тока показана на рис. 4. В данном случае один полюс используется для управления и два для подключения однофазной нагрузки. Применение токоограничивающего резистора с сопротивлением 50 Ом исключает перегрузку цепи управления и обеспечивает ток не менее 0,6 А, что вполне достаточно при самых распространённых значениях номинального отключающего дифференциального тока (0,03; 0,1; 0,3 А). Поскольку сигнал является импульсом постоянного тока, для ВДТ типа АС требуется подобрать полярность подключения.

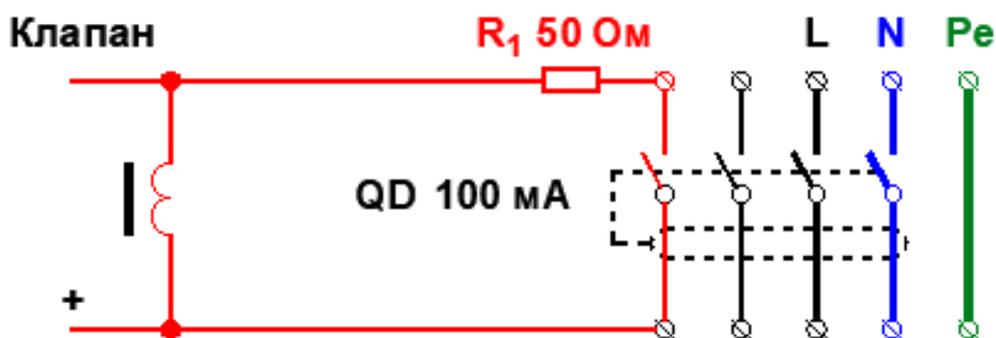


Рисунок 4 – Схема подключения к цепи управления запорного клапана подачи газа.

Защита от обрыва защитного проводника и от протечки воды.

Электроприборы, которые подключаются к водопроводу (бойлеры, стиральные и посудомоечные машины), как правило имеют защиту конечной цепи с устройством дифференциального тока. Поэтому несложно обеспечить их дополнительную защиту. Испытания для данного варианта выполнены на стенде с комплектующими, показанными на рис. 5. При этом управление устройством дифференциального тока осуществлялось по радиоканалу с помощью радиореле (РР), а совмещённый радиодатчик (РД) контролировал как протечку воды (Пр), так и обрыв защитного проводника. Совмещённая конструкция состояла из серийного беспроводного датчика напряжения, выход которого с помощью резисторов был согласован с входом серийного

датчика протечки. Для упрощения на схеме (рис. 5а) защитный проводник P_e и место его обрыва показаны отдельно. Фактически защитный проводник подключался вместе с фазным L и нейтральным N через розетку. Поскольку в конструкции имеется сетевой фильтр с заземляемым соединением конденсаторов $C_L - C_N$, при моделировании обрыва защитного проводника на корпусе электроприбора возникает напряжение 95...115 В. Его и регистрирует датчик напряжения. Соответствующий сигнал об аварии передаётся по радиоканалу, радиореле РР замыкает цепь с токоограничивающим резистором R_1 в диагонали устройства дифференциального тока QFD, оно срабатывает и электропитание прекращается. В случае пролива воды авария прекращается за счёт реагирования датчика протечки и запираания клапана Кл после отключения электропитания.

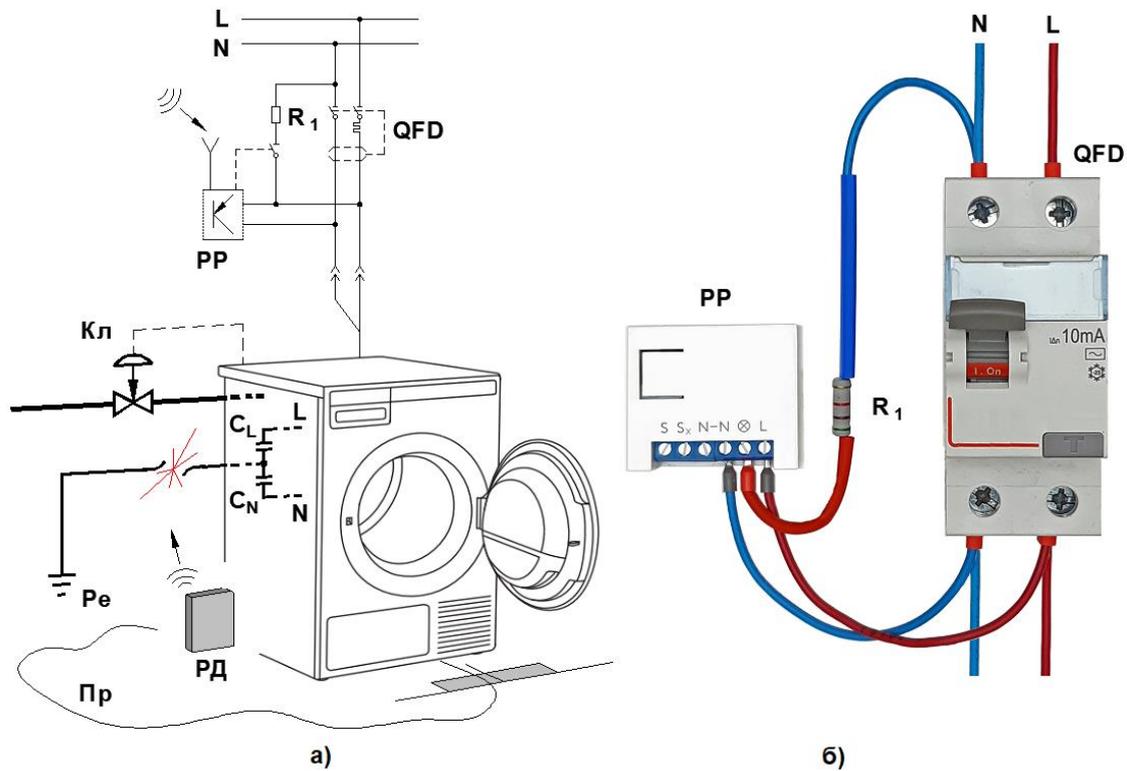


Рисунок 5 – Защита от протечек и обрыва защитного проводника: схема (а), соединение компонентов (б), QFD – устройство дифференциального тока (10 мА), PP – радиореле Rubetek RE-3311, РД – совмещённый радиодатчик (беспроводный датчик напряжения КВТ КТ 100 Proline 79134 и датчик протечки воды Rubetek RS-3220), R1 – резистор (5,1 кОм), CL, CN – конденсаторы сетевого фильтра, Кл – запорный клапан подачи воды, Пр – протечка воды.

Защита с линейными датчиками протечек.

Данное испытание выполнено на действующей насосной станции с погружным насосом GRUNDFOS SP8A-25 ($Q=8$ м³/час, $H=107$ м, $N=4$ кВт). Фотографии оборудования и схема защиты показаны на рис. 6. В блоке управления было применено реле уровня РУ, которое обеспечивало гальваническую развязку между линейными датчиками протечки ДП₁...ДП₃ и устройством дифференциального тока QD (ВДТ 25 А, 30 мА). Для имитации аварии использовано дефектное

соединение водопровода, под которым размещался линейный датчик протечки. Он состоял из проводников из нихрома, расположенных вдоль текстильной ленты с петельно-крючковыми зацепами. В случае затопления в любом месте по длине датчика за счёт реагирования реле уровня замыкалась цепь с резистором R₁ в диагонали устройства дифференциального тока, в результате электропитание насоса прекращалось.

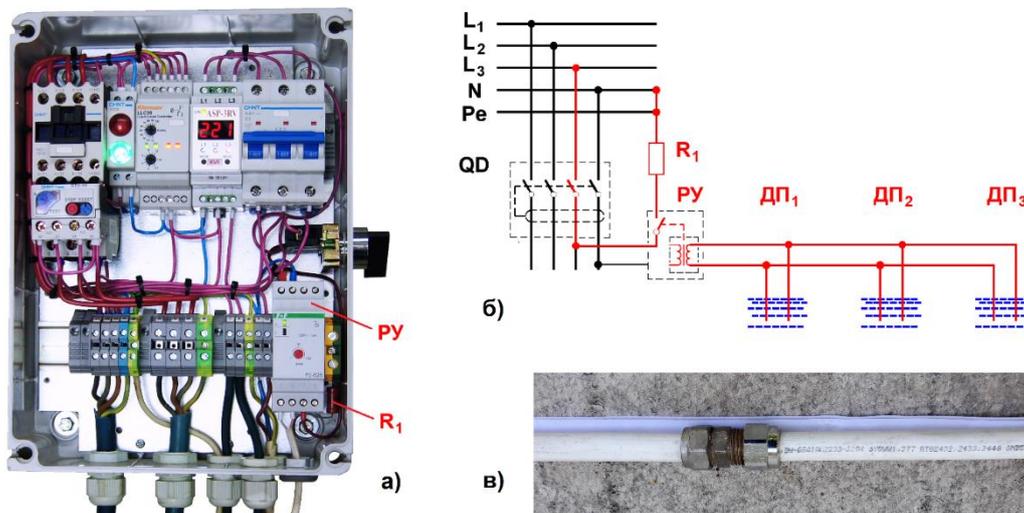


Рисунок 6 – Блок управления насосом (а), схема защиты (б), дефектное соединение водопровода на линейном датчике протечек (в): РУ-реле уровня PZ-828, ДП₁...ДП₃ – датчики протечки.

Защита от повреждения проводников с дифференциальными диполями.

Дифференциальный диполь образуется при встречно-последовательном соединении двух полюсов устройства дифференциального тока. Поэтому из серийной двухполюсной модели можно получить один диполь, а из четырёхполюсной один или два диполя (бидиполь), сборки с ними показаны на рис. 7. Там же приведены схемы, которые использовались для организации испытаний. Каждый диполь имеет трёхпроводное подключение, это отражено и в пиктограмме на рис. 1. Принцип действия диполя и бидиполя связан с балансом токов дифференциального датчика. Если основные проводники (они на схемах

выделены толстой линией) не повреждены, то баланс токов не нарушается. Повреждение основного проводника (обрыв или повышение сопротивления) приводит к тому, что возникает ток через линию контроля. Для приведённых сборок эти линии содержат токоограничивающие RC цепи. В результате перераспределения токов между полюсами нарушается баланс, устройство дифференциального тока срабатывает и электропитание нагрузки R_N прекращается. Принцип построения универсальной защиты сохраняется в полном объёме, поскольку к дифференциальным диполям можно подключать средства автоматики, контролирующие неэлектрических показатели.

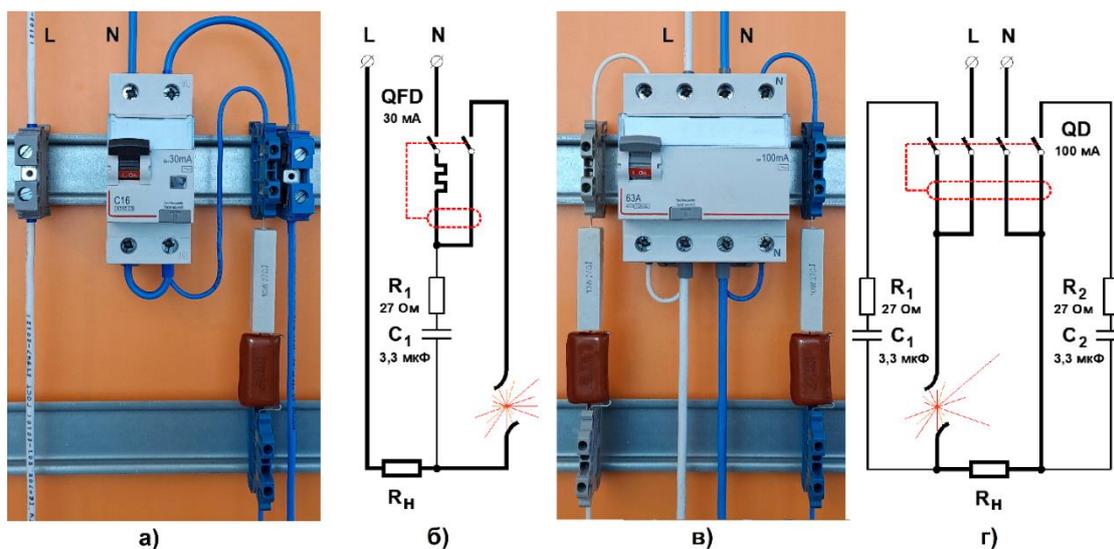


Рисунок 7 – Сборка с диполем (а), сборка с бидиполем (в), схемы сборок (б, г).

Защита от повреждения проводников с дифференциальными блоками.

Дифференциальные диполи удобно применять для защиты отдельных проводников, а бидиполи - для полной защиты однофазной нагрузки. В случае трёхфазной нагрузки тот же результат можно получить в разных комбинациях нескольких серийных устройств дифференциального тока, а также при соединении с реле или с вспомогательными контактами. В данном случае под дифференциальным блоком понимается функционально связанная группа компонентов, которые могут быть собраны в одном электрощите или расположены удалённо один от другого. Пример дифференциального блока приведён на рис. 8. В данной схеме защиты последовательно соединены два одинаковых ВДТ: QD₁ и QD₂ (100 mA). Кроме того, имеются механически соединённые с расцепителем устройства QD₂ вспомогательные контакты K₁, которые через токоограничивающий резистор R_K замыкают на

землю фазный проводник на выходе устройства QD₁. Также тут применена четырёхпроводная контрольная цепь с резисторами R₁, R₂, R₃, R_N для связи клемм нагрузки R_{N1}, R_{N2}, R_{N3} с входами устройства QD₂. Подключение термостата через токоограничивающий резистор R_t как обычно показано между фазным проводником и заземлением только для демонстрации возможности контроля неэлектрических показателей и доступности отключения электропитания по сигналам пожарной и противоаварийной автоматики.

Осциллограмма, совмещённая со схемой (рис. 8а), отражает результат теста на повреждение нейтрального проводника. В начальный момент этого эксперимента устройства QD₁, QD₂ и контакты K₂ замкнуты, а контакты K₁ разомкнуты. Резисторы R₁, R₂, R₃, R_N оказываются зашунтированными и ток через них незначительный. Так осуществляется нормальный режим работы.

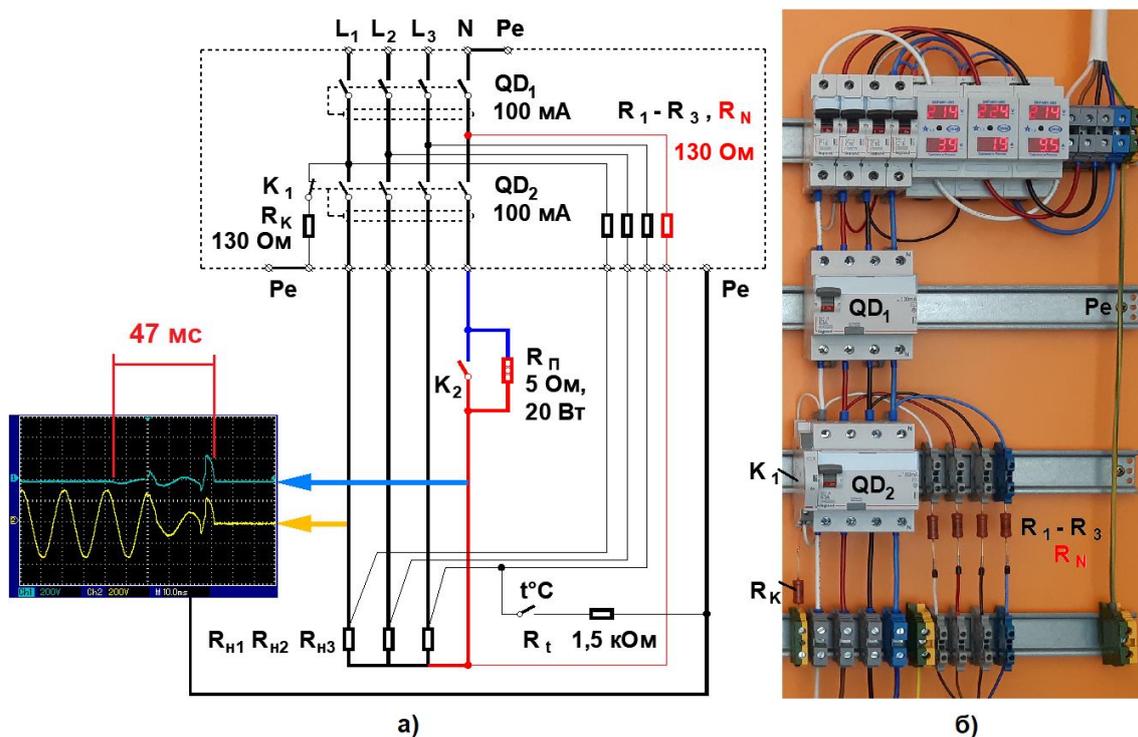


Рисунок 8 – Схема (а) и сборка (б) к испытанию дифференциального блока.

Имитация повреждения нейтрального проводника выполняется путём размыкания контактов K_2 . В результате сопротивление цепи нейтрального проводника увеличивается до сопротивления резистора R_{Π} (5 Ом). При несимметричной нагрузке возникает разность потенциалов на резисторе R_N и нарушается баланс токов устройства QD_2 . Оно срабатывает, контакты K_1 замыкаются, соответственно нарушается баланс токов устройства QD_1 , и оно также срабатывает. Электропитание прекращается и по осциллограмме переходного процесса видно, что время отключения составило 0,047 с. Аналогично защита действует при повреждении (обрыве или увеличении сопротивления) цепи любого фазного проводника.

Защита от перенапряжения и падения напряжения с денонсаторами.

Контроль напряжений в конечных цепях выделен в отдельный раздел программы испытаний, поскольку простые блоки – денонсаторы практически удобно подключать к розеткам и использовать автономно без каких-либо изменений проекта электроснабжения (рис. 9).

В данной сборке реле напряжения и таймер (реле времени) параллельно подключены через розетку, а их выходные контакты K_1 , K_2 образуют последовательную цепь через резистор R с входами радиодатчика РД. При включении электропитания контакты K_1 замкнуты, а K_2 разомкнуты, как показано на схеме. Поэтому цепь управления разомкнута и радиодатчик РД сигнал об аварии не передаёт. Затем, если напряжение находится в рабочем диапазоне, реле напряжения переключается, и контакты K_1 оказываются разомкнутыми. После установленной выдержки по времени замыкаются контакты K_2 , но цепь управления остаётся разомкнутой, и денонсатор переходит в дежурный режим контроля напряжения. При падении напряжения или при перенапряжении в реле напряжения замыкаются контакты K_1 цепи управления и радиодатчик РД передаёт сигнал об аварии. Этот сигнал принимает радиореле РР, показанное на рис. 5. В результате замыкается цепь управления устройства дифференциального тока, оно срабатывает, и электропитание прекращается.

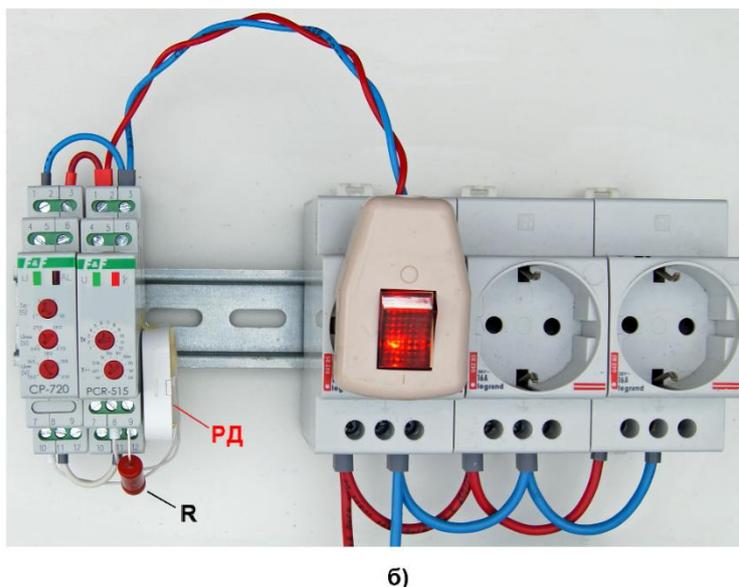
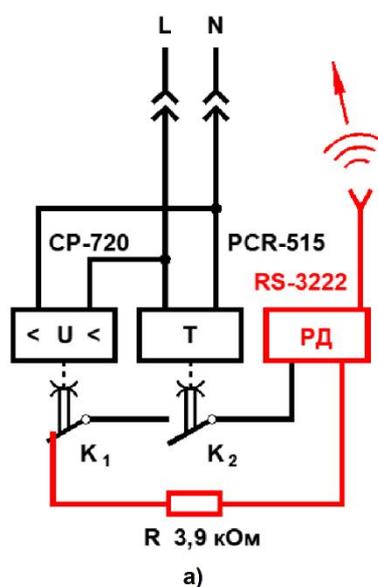


Рисунок 9 Схема (а) и сборка (б) денонатора: CP-720 реле контроля максимального и минимального напряжения «Евроавтоматика», PCR-515 реле времени «Евроавтоматика» (Т), RS-3222 - радиодатчик Rubetek (РД), K_1, K_2 – контакты реле, R – резистор.

Термостат или любой другой контролёр неэлектрических показателей также может быть подключён к входу радиодатчика РД через резистор R параллельно с группой контактов K_1, K_2 . Таким образом денонатор адаптируется для комплексного контроля показателей работы непосредственно у места удалённой установки, в том числе внутри корпуса электроприбора.

Защита с датчиками звука и вибрации.

В рассматриваемую программу испытаний были включены тесты с датчиками звука RS-3250 Rubetek и удара Z09 Вымпел 6041. При этом управление устройством дифференциального тока выполнялось по схеме, показанной на рис. 5.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Испытания сборок, построенных по принципу универсальной защиты, подтвердили эффективность применения устройств дифференциального тока в качестве приборов управления, а также возможность своевременного реагирования на отклонение электрических и неэлектрических показателей. Конечно, автоматика контроля неэлектрических показателей имеет собственные время-нагрузочные характеристики, но в данном случае мы ограничиваемся оценкой оперативности обработки полученных от неё сигналов. Важно то, что экспериментально подтверждена возможность своевременного отключения электропитания при обнаружении утечки газа, протечки воды, вибрации, перегрева и т.д.

Поскольку на практике как правило применяются серийные модели устройств дифференциального тока с характеристикой наибольшей отключающей способности 4,5 или 6 и 10 кА, то универсальное решение может применяться без дополнительных контакторов, в том числе для организации защиты от сверхтоков (при перегрузке, коротком замыкании,

параллельном дуговом пробое). При этом показано, что сборки с устройствами дифференциального тока могут использоваться в качестве реле тока или в составе с реле тока, а также в составе с реле напряжения.

Среди полученных данных особо важно отметить быстродействие и высокую чувствительность. Теоретически предельные значения времени отключения по ГОСТ IEC 61008-1-2020, ГОСТ IEC 61009-1-2020 в зависимости от дифференциального тока находятся в пределах от 0,04 до 0,3 с. В связи с этим ожидалось, что время отключения питания одним устройством дифференциального тока не превысит указанных значений, а для сборок с двумя устройствами (для дифференциальных блоков) время отключения не превысит удвоенных значений теоретических пределов. Фактически за счёт подбора токоограничивающих компонентов для использованных моделей ВДТ и АВДТ во всех тестах быстродействие оказалось выше намеченного. Осциллограммы показали, что для моноустройств (в том числе для дифференциальных диполей) время отключения составляло 0,02...0,03 сек, а для дифференциальных блоков находилось в пределах 0,04...0,06 сек.

Чувствительность к сигналу управления определялась выбором значения номинального отключающего дифференциального тока (0,03; 0,1; 0,3 А). Такие токи несложно получить с помощью токоограничивающих компонентов при любом заранее заданном напряжении. Однако при повреждении проводников напряжения и токи зависят от ряда случайных процессов. Тем не менее экспериментально показано, что предлагаемые схемы контроля устойчивы даже при такой неопределённости. Так, чувствительности дифференциального диполя (0,03А) было

достаточно для отключения при обрыве проводника с нагрузкой цепи 40 Вт (230 В), т.е. при токе менее 0,2 А.

Для сравнения базовые требования по реагированию на обрыв с дуговым пробоем можно заимствовать из ГОСТ ИЕС 62606—2016, где в Таблице 1 приведены предельные значения времени отключения. Оно для токов в диапазоне от 2,6 до 63 А не должно превышать значений от 1 до 0,12 сек. Применение дифференциальных диполей или блоков даёт на порядок лучший результат по чувствительности, и как уже сказано, зафиксирована реакция на обрыв при токе 0,2 А. Также против стандартных значений наблюдалось многократное уменьшение времени отключения. Причём такая высокая эффективность достигалась доступным изменением сборок серийных моделей устройств дифференциального тока вместо использования дорогостоящих специализированных устройств защиты от дугового пробоя.

Применение устройств дифференциального тока, функционально не зависящих от напряжения сети, кроме того, позволило подтвердить работоспособность универсальной защиты в диапазоне напряжений от 90 до 400 В, т.е. при значительном падении напряжении и при перенапряжении.

ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетнее освещение научно-популярной версии каждого варианта универсальной защиты можно найти в социальных сетях. Также активно данная тема ранее обсуждалась на встречах специалистов. Поэтому в настоящей статье далее будут рассмотрены ответы на некоторые общие вопросы.

Существует мнение о том, что для внедрения предлагаемых схем требуются дополнения в нормативные документы по электробезопасности, пожарной и противоаварийной безопасности. И видимо, такие дополнения лишними не будут. Вместе с тем, как уже сказано, предлагаемый подход полностью соответствует действующим нормативным правовым актам и нормативным документам. Их вполне достаточно для включения в технические задания на проектирование объектов требований о координации действий штатных устройств дифференциального тока и средств пожарной (противоаварийной) автоматики.

Определённое беспокойство вызывает предполагаемое увеличение затрат. При этом оппоненты сразу идут в наступление от сложных вариантов со всеми возможными степенями защиты. Тут важно подчеркнуть, что универсальная защита даёт преимущества даже в самом бюджетном исполнении. Например, для помещений многоквартирного дома не надо устанавливать новых устройств дифференциального тока и новых пожарных извещателей, поскольку по действующим нормам их и так уже обязаны установить. Достаточно лишь обеспечить подачу сигнала управления от

пожарной сигнализации на штатные устройства дифференциального тока.

Большое число вариантов вызывает неопределённость при выборе между контролем температуры соединений и контролем повреждения проводников (контролем дугового пробоя). Тут, чтобы точно обосновать решение придётся сравнивать экономические и технические различия. Однако по тем объектам, по которым соответствующие расчёты уже выполнены, можно сделать вывод, что организация контроля температуры более информативна и выгодна.

Отдельной дискуссии заслуживает выполнение цепей, содержащих выключатели и разъёмные соединения. Некоторые рецензенты считают, что применение дифференциальных диполей и блоков в этой части электроустановок невозможно. Тем не менее, если сделать несложное дополнение для отключения контроля на время коммутации цепи, то контроль целостности окажется полноценным, и потом защита сработает даже при плохом контакте в розетке или в выключателе. Тут следует напомнить, что приём временного прекращения контроля уже использован в денонсаторе, т.е. доказано, что такой способ вполне пригоден для решения задачи. Практически для контроля дуги в розетке необходимо использовать многополюсную вилку (с дополнительными штекерами). Через основные штекеры должна быть подключена нагрузка, а через дополнительные – цепь управления. Тогда контроль обрыва (искрения и дуги) будет выполняться и в розетке, и дальше (везде, где необходимо). Такой приём хорошо известен, есть много примеров подключения через многополюсные вилки с функцией контроля. Подобным образом могут работать USB разъёмы, зарядные станции электромобилей, блоки сигнализаций и т.д. Тем не менее, следует повторить, что для розеток и вилок более важно контролировать температуру, поскольку источником зажигания всегда будут нагретые соединения с большим переходным сопротивлением [16, 17].

Иногда в обсуждениях возникает вопрос собственного энергопотребления сборок для универсальной защиты. В связи с этим можно указать, что такое потребление возможно только со стороны применяемых в сборках реле, и поскольку все они слаботочные, то потребление будет существенно меньше, чем при использовании в качестве приборов управления контакторов.

Следующий также экономический вопрос касается использования дополнительных проводников для организации контроля и управления. Так, в сборке дифференциального блока (рис. 8) имеется четыре проводника контрольных цепей, которые соединяют нагрузку и устройства дифференциального тока фактически параллельно с основными проводниками. Это действительно определяет дополнительные расходы. Впрочем, токи в цепях управления во всех ситуациях незначительные (не превышают 2 А).

Следовательно проводники цепей управления можно объединить в кабель с небольшим сечением жил, например, $4 \times 0,75 \text{ мм}^2$, и он будет намного дешевле, чем основная кабель питания нагрузки.

Контроль неисправностей и защита цепей управления – ещё один повод для размышлений о проблемах универсальной защиты. На самом деле незначительные усовершенствования (доработки) позволяют организовать индикацию исправности линий формирования сигналов управления. Такие линии образуют проводники, соединяющие устройства дифференциального тока и средства автоматики. В рабочем состоянии между ними должно быть сетевое напряжение (230 В), что легко фиксируется слаботочным оптическим индикатором, либо оптопарой для дистанционной передачи информации. Например, для схемы на рис. 3 индикатор подключается параллельно с минитермостатом 20. Ток индикации незначительный и на работу защиты не влияет. Также для всех цепей управления можно рекомендовать применение предохранителей или автоматических выключателей с небольшим номинальным током (до 3 А).

Порядок включения универсальной защиты в некоторых вариантах требует ручного управления, поскольку в начальный момент возможно ложное срабатывание. И с этим замечанием следует согласиться тем более, что определённая последовательность действий уже рассмотрена для пуска сборки по схеме на рис. 3. Однако и там вместо ручного контакта K_1 можно предусмотреть такое же реле времени, как в денонсаторе по схеме на рис.9. В некоторых случаях задача автоматизации пуска решается ещё проще. Для этого следует учитывать, что полюс, коммутирующий нейтраль четырехполюсных устройств дифференциального тока, размыкается позже и замыкается раньше других полюсов (п. 8.1.2 ГОСТ IEC 61009-1-2020). Обычно такой же порядок соединения контактов полюсов выполняется и для двухполюсных моделей. Поэтому сборку, показанную на рис. 7а,б можно смело включать под нагрузкой, не опасаясь ложных срабатываний. В этой связи даже рекомендуется способ проверки последовательности замыкания контактов полюсов без приборов. Так, если не происходит ложных срабатываний для устройств на рис. 7, то раньше замыкаются контакты полюсов, расположенные ближе к нагрузке. Если под нагрузкой происходит ложное срабатывание, то раньше замыкаются контакты полюса, которые расположены ближе к источнику питания.

Более существенное замечание касается реагирования на падение напряжения. Дело в том, что СП 256.1325800.2016 сдержит указание А.4.9 о том, что в жилых зданиях не допускается применять устройств дифференциального тока, автоматически отключающих потребителя от сети при исчезновении или недопустимом снижении напряжения сети. Очевидно, что предлагаемые сборки (рис. 2, 3 и рис. 9) этому требованию не соответствуют. Правда, при исчезновении

напряжения они не отключаются. Но реакцию при снижении напряжения следует рассмотреть более подробно. Поскольку падение напряжения связано с потерями до места контроля, оно является следствием перегрузки, повреждения проводников и (или) высоких переходных сопротивлений. Любая из этих причин может быть опасна развитием как аварийного, так и пожароопасного режима. Автоматическое отключение устройства дифференциального тока в этом случае будет первоочередным действием по предотвращению развития опасной ситуации. В связи с этим приведённое требование свода правил следует считать необоснованным и подлежащим отмене.

Признавая низкую чувствительность устройств защиты от дугового пробоя, некоторые специалисты предлагают устанавливать их только ради диагностики неисправностей. При этом дуговой пробой будет инициироваться механическим путём вручную раскачиванием и смещением проводников, соединений и гибких шнуров (удлинителей) питания. В общем многочисленные тесты подтверждают, что устройства защиты от дугового пробоя бесполезны для неподвижных соединений и реагируют лишь на механическое замыкание и размыкание подвижных частей [16]. Однако даже для такой диагностики гораздо надёжнее будет применить дифференциальные диполи или блоки. Ради этого рекомендуется изготовить щуп с длинным проводником и токоограничивающим резистором. Как показано для цепей контроля на рис. 8 этим щупом следует соединять вход штатного устройства дифференциального тока QD_2 и нагрузку. Устройство дифференциального тока будет отключаться при обрыве или увеличении сопротивления контролируемой цепи питания нагрузки. Таким образом можно будет найти места повреждений без изменения схемы электроснабжения и без дополнительных приборов.

Вопрос сертификации продукции, как правило сопровождает обсуждения любой защиты. Поскольку неоднократно указано, что для всех вариантов используются только серийные комплектующие, запрос документов, подтверждающих их соответствие, следует переадресовать изготовителям. При этом необходимо учитывать, что устройства защитного отключения, таймеры и контролёры подлежат подтверждению соответствия требованиям технического регламента ТР ТС 004/2011, а средств пожарной автоматики - ТР ЕАЭС 043/2017.

Наиболее консервативное мнение об универсальной защите сводится к тому, что в качестве приборов управления по назначению должны использоваться контакторы и независимые расцепители. В связи с этим ранее уже выполнено подробное сравнение решений, которое выявило явные технические и экономические преимущества применения устройств дифференциального тока [3]. В том числе важно отметить, что доступность множества вариантов защиты получена именно за

счёт способности отключать электрическую цепь, когда дифференциальный ток достигает заданного значения. Также для обеспечения надёжности защиты имеет значение такой аспект эксплуатационного контроля, как проведение периодических проверок, которые для систем пожарной сигнализации проводятся ежеквартально. Важно, что применение устройств дифференциального тока в качестве приборов управления обеспечивает включение их в графики проверки наравне со средствами пожарной (противоаварийной) автоматики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщение результатов испытаний универсальной защиты показывает, что инженер-проектировщик теперь имеет в своём распоряжении широкую палитру вариантов, комбинированием которых можно добиться наилучшего результата на каждом конкретном объекте. Дополнительно к представленным экспериментальным данным эффективность и надёжность сегодня можно подтвердить многолетним опытом применения универсальной защиты в насосных станциях, жилых и общественных зданиях.

Предлагаемое решение задач безопасности, актуальное в связи с большим числом пожаров и аварий [17], является на сегодня наиболее доступным для электроустановок различного назначения. Адаптацию решения во всех системах помощи человеку «Умного дома» и «Безопасного производства» всегда можно обеспечить благодаря свободному выбору как проводных, так и радиоканальных схем управления.

Отключение электропитания в случае применения универсальной защиты как правило является признаком серьёзной неисправности. В связи с этим автоматическое повторное включение не предусматривается. Вместо этого рекомендуется перед включением всегда определить и устранить причину нарушения нормального режима работы. Так, если на корпусе было обнаружено напряжение, нельзя допустить автоматическое повторное включение. Также перед включением следует обследовать электроустановку при протечке воды, утечке газа и в других ситуациях.

Автоматическое выполнение первоочередных действий защиты в сочетании с контролем большого перечня электрических и неэлектрических показателей существенно повысит безопасность электроустановок. Важно, что универсальная защита будет полезна, как при неисправности электрооборудования, так и при нарушении правил эксплуатации. В том числе она сможет упреждать действие автоматических и автономных установок пожаротушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Musial E., Czapp S. Wyłączniki ochronne różnicowoprądowe. Powstanie, rozwój, przyszłość /

Miesięcznik SEP "Informacje o normach i przepisach elektrycznych". 2008, nr 108, s. 3-46.

Патент на изобретение СССР № 1761. Устройство для защиты трёхфазных установок от однофазных замыканий на землю. Подольский Л.П. - 02.02.1924

Мельников В.С. Пожарная автоматика защитного отключения электроустановок. М.: Мир науки, 2019. — 152 с.

Патент RU 102152 U1. Устройство защитного отключения. Ступак И.А., Шварц Г.К. — 30.06.2010

Патент RU 124451 U1. Устройство для отключения полезной нагрузки от электрической сети при наличии автоматических выключателей, управляемых дифференциальным током. Мкртумов А.С., Немцов А.Н., Немцов Ф.Н. — 10.09.2012

Патент RU 43653 U1. Устройство активной защиты от электропоражений работающих в электроустановках под напряжением. Халин Е.В., Коструба С.И., Стребков Д.С. — 10.09.2004

Патент RU 208655 U1. Устройство защиты от перегрева штепсельных соединителей электрических сетей, в которых может отсутствовать защитный проводник. Купцов В.Д., Зубов Б.Н. — 29.07.2021

Авторское свидетельство СССР № 1513561. Устройство для защиты от повреждения в трёхфазных электроустановках. Коструба С.И. — 23.05.1986.

Патент RU 2246160 C1. Устройство защитного отключения. Халин Е.В., Коструба С.И. — от 16.10.2003.

Патент RU 72571 U1. Устройство контроля обрыва нулевого проводника в электросети для узо (укопнэ-узо). Сокол Г.Н. - от 02.10.2007

Патент RU 30470 U1. Однофазное устройство защитного отключения. Дасько Г.Д., Коструба С.И., Стребков Д.С., Халин Е.В. — 31.01.2003

Патент RU 2619777 C2. Устройство защиты электрических потребителей от перенапряжений в однофазных сетях переменного тока / Панов В.Н. - 29.05.2015

Патент RU 174735 U1. Устройство защиты контактов штепсельного соединения от перегрева. Рассохин А.В. — 11.05.2017

Патент RU 207595 U1. Устройство защиты от перегрева штепсельных соединителей электрических сетей. Купцов В.Д., Зубов Б.Н. — 09.06.2021

Патент RU 157891 U1. Сигнализатор предельного уровня воды в сосуде. Белов А.В., Поворознюк А.А. — 18.05.2015

Мельников В.С. Пожарная безопасность электроустановок, алгоритм зажигания / Международный научно-исследовательский журнал. — 2023 — №1

Мельников В.С. Пожарная безопасность электроустановок, универсальное решение и итоги применения защиты от дуги / Международный научно-исследовательский журнал. — 2023 — №3

СПОСОБ КОНСТРУКТИВНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ АНТЕНН АФАР ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ (КА) НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ (НССС) ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МАССА – ГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.

Рысин А. В.*АНО «НТИЦ «Техком»
г.Москва, радиоинженер***Бойкачев В.Н.***АНО «НТИЦ «Техком»
г.Москва, директор
кандидат технических наук***Наянов А.М.***АНО «НТИЦ «Техком»
г.Москва, нач.сектора***A METHOD FOR THE CONSTRUCTIVE ARRANGEMENT AND DECOMPOSITION OF ANTENNAS (APAA) FOR MULTIFUNCTIONAL USE IN SPACECRAFT OF LOW-ORBIT SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS (LOSSES) WHILE OPTIMIZING RADIO ENGINEERING PARAMETERS AND MASS-DIMENSIONAL CHARACTERISTICS.****Rysin A.,***ANO "STRC" Technical Committee"
Moscow, radio engineer***Boykachev V.,***ANO "STRC" Technical Committee"
Moscow, director,
candidate of technical sciences***Nayanov A***ANO "STRC" Technical Committee"
Moscow, head of the sector***АННОТАЦИЯ**

На современном этапе развития космических систем остро стоит вопрос о засорённости космоса спутниками различного назначения. Причём количество спутников возрастает громадными темпами. Так в системе Starlink предполагается использовать до 12000 спутников. В данной статье на основе анализа характеристик известных систем предлагается многофункциональное использование спутников при их оптимальном количестве за счёт нового способа конструктивного расположения и разложения активных фазированных антенных решёток (АФАР).

ANNOTATION

At the present stage of the development of space systems, the issue of space contamination by satellites for various purposes is acute. Moreover, the number of satellites is increasing at an enormous pace. Thus, up to 12,000 satellites are supposed to be used in the Starlink system. In this article, based on the analysis of the characteristics of known systems, the multifunctional use of satellites with their optimal number is proposed due to a new method of constructive arrangement and decomposition of active phased antenna arrays.

Ключевые слова: радиосвязь, панели АФАР, радиовысотомер, локатор бокового обзора, межспутниковая связь, Internet, КА НССС.

Keywords: radio communication, panels of active phased antenna arrays, radio altimeter, side-view locator, inter-satellite communication, Internet, spacecraft of low-orbit satellite communication systems.

Понятно, что суть нового способа и устройства относится к формированию действий, которые в сумме дают многофункциональное использование КА с улучшением тактико-технических и радиотехнических характеристик, с получением экономического выигрыша, которые раньше никем не предлагались. При этом в силу того, что разрыв между коэффициентами усиления антенн для связи и для работы в режимах локатора бокового обзора составляет 20 дБ и было использовано компромиссное решение за счёт складывающейся

конструкции панелей антенн с коэффициентом усиления каждой в 30 дБ под обтекателем ракеты с раскрывом в космосе. Соответственно потребовалось оптимизировать и радиотехнические параметры с учётом допустимых размеров антенн. Это и позволило совместить в одном КА многофункциональные режимы с оптимизацией размеров антенн с учётом несущих частот, полосы пропускания, веса и улучшением радио и тактико-технических характеристик.

Современная тенденция развития спутниковых систем для радиосвязи, навигации, радиовысотометров, локаторов бокового обзора в конструктивном исполнении антенн идёт по пути

использования расположения антенн на одном плоском основании (панели). Например, это было использовано в системе космической радиосвязи Globalstar [1] (рисунок 1).

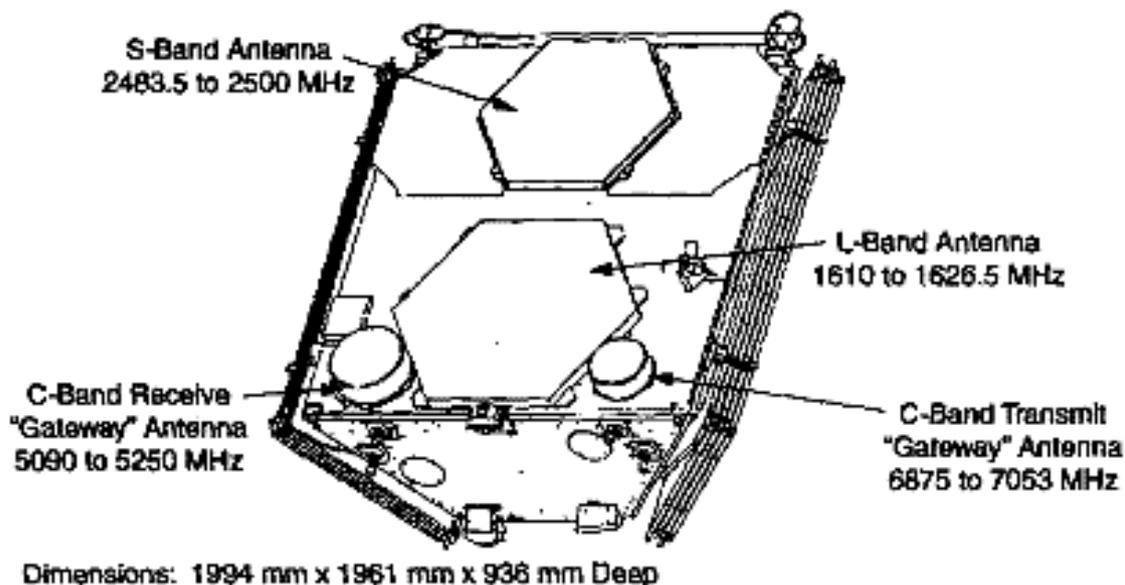


Рисунок 1. Расположение антенн Globalstar на плоском основании (панели).

Этот подход также был продолжен в системе спутниковой связи OneWeb [2] (рисунок 2).

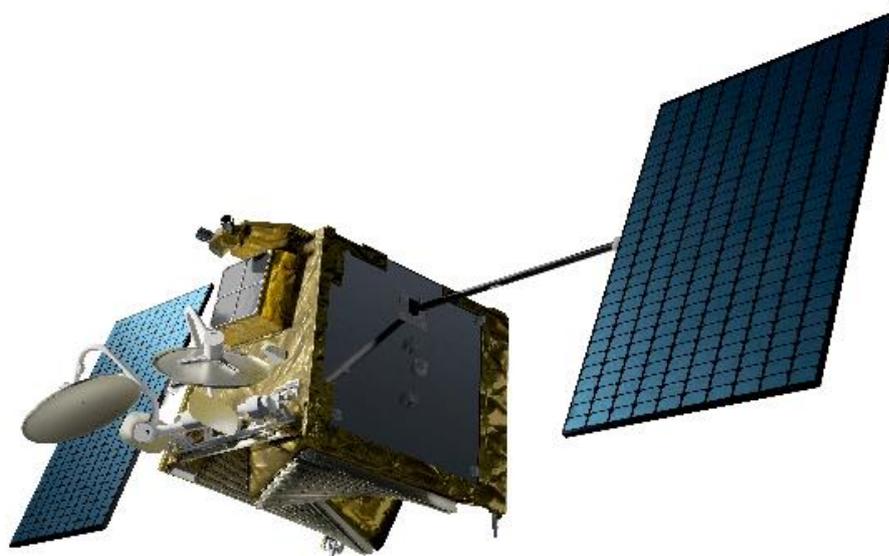


Рисунок 2. Расположение целевых фазированных антенных решёток OneWeb находится внизу конструкции.

Такой же вариант расположения антенн был выбран и для Starlink [3] (рисунок 3).

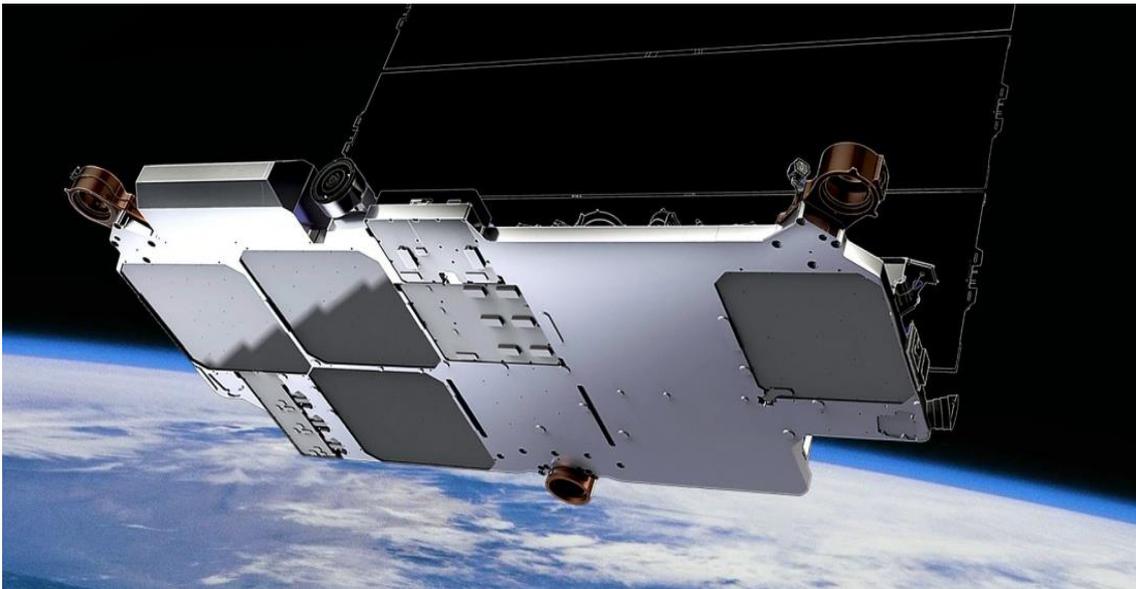


Рисунок 3. Расположение антенн в спутнике Starlink.

Понятно, что данное расположение антенн приводит к необходимости увеличивать группировку спутников с ростом экономических затрат и приводит к засорённости космоса.

Здесь для того, чтобы обслуживать большой радиус пятна на Земле требуется управление лучом антенной фазированной решётки (АФАР) с довольно большим отклонением луча, что снижает энергетический потенциал. Однако известно и

другое конструктивное расположение антенн в спутниках Iridium [4], где обеспечивается довольно большой охват пятна обслуживания пользователей на Земле с использованием трёх панелей, в каждой из которых находится по две фазированной антенной решётки, расположенных под одним углом, одна над другой, что связано с сокращением энергетических потерь при обслуживании пятна на Земле большого радиуса.

Photo : Daniel Deak

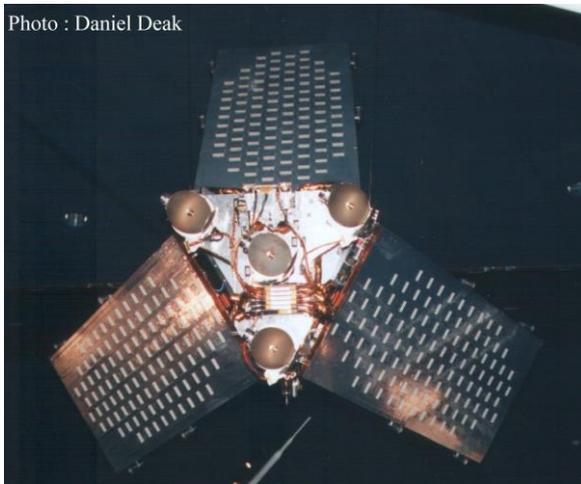


Рисунок 4. КА Iridium.

Так, космический аппарат (КА) Iridium летает на высоте 780 км и имеет на 3 панелях 6 антенн, работающих на приём и передачу с использованием режима разделения во времени и разделением каналов по частоте с формированием в каждой антенне до 8 лучей одновременно. Общая потребляемая мощность 1,4 кВт. Размер одной панели 1860 мм×860 мм×40 мм с использованием 106 элементов АФАР (активная фазированная антенная решётка) в L-диапазоне 1616-1626,5 МГц. Коэффициент использования площади антенны

составляет $K_{исп} = 0,707$ при отклонении луча на 45 градусов от нормали к апертуре антенны. В реальности при обзоре 120 градусов угол отклонения луча от нормали составляет ± 60 градусов и коэффициент использования будет 0.5 и менее. При этом, общая средняя выходная мощность на передачу, с учётом скважности $Q = 2$, составляет $8 \text{ Вт} \times 48 \text{ лучей} / 2 = 192 \text{ Вт}$. Для формирования многолучевой системы с использованием всей площади одной и той же антенны была применена диаграммо - образующая

схема Батлера, что хоть и обеспечивало широкий сектор обзора при узких лучах разной частоты, но сужало общую полосу пропускания антенны (это исключает многофункциональное применение) и требовало использования многочастотного режима. Кроме того, для обслуживания одновременно большого количества абонентов (в Iridium это более 1100 пользователей одновременно) требуется большое количество параллельных каналов при приёме и передаче, а это связано с использованием линейного режима класса «А» [5], как при приёме, так и при передаче. Но, при передаче в линейном режиме коэффициент полезного действия (к.п.д.) в многочастотном режиме, например, в системе Globalstar составляет 30% (по теории 48%) и соответственно это требует источник питания в 640 Вт. В одночастотном режиме класса «В» по теории к.п.д. составляет 78%, но по отношению к к.п.д., полученному на практике для многочастотного режима, будем считать улучшение к.п.д. в

одночастотном режиме в $(78\%/48\%)=1,625$ раза (48,75%), и здесь тогда требуется источник питания в 394 Вт. Кроме того, обеспечить линейный режим работы на приём при обработке большого количества входных сигналов на основе аналого-цифрового преобразования достаточно сложно, требуется многоуровневый АЦП для исключения подавления слабого сигнала более сильным сигналом, а это связано с энергетическими затратами и требуется высокая тактовая частота дискретизации. Поэтому в системах связи типа Iridium и Globalstar используется компромиссное решение и одновременно с многочастотным режимом вводят временное разделение, что позволяет при учёте раздельного режима приёма-передачи обслужить в 4 раза больше абонентов. В этом случае количество одновременно обслуживаемых абонентов равно $48 \times 4 = 192$ за счёт разделения во времени (Рисунок 5).

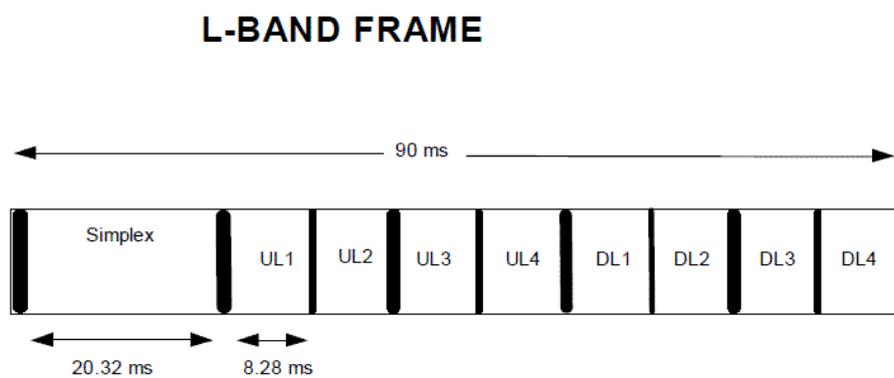


Рисунок 5. – Формат МДВР-кадра «Iridium»
(UL1-UL4 – восходящие каналы, DL1-D4 – нисходящие каналы)

Но, чтобы получить приемлемое количество абонентов, более чем тысяча, в Iridium предусматривается и частотное разделение в одном

луче до 6 одновременно работающих параллельно частотных канала, рисунок 6.

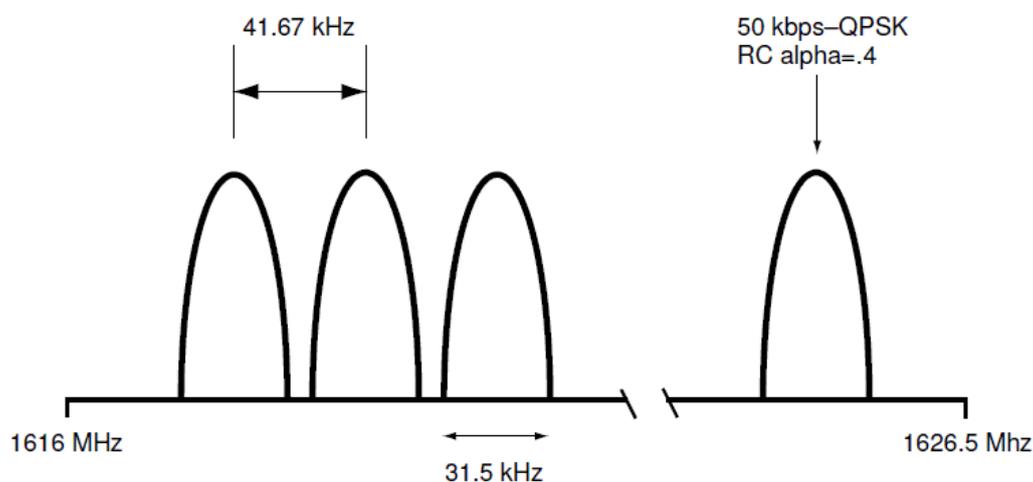


Рисунок 6. Частотный план системы «Iridium»

Отметим, что для Globalstar таких параллельных каналов 13. В этом случае для Iridium мы имеем $48 \times 4 \times 6 = 1152$ абонента, обслуживаемых одновременно. И это означает, что с учётом

частотного разделения выделяемая мощность на пользователя равна $8/6 = 1,3$ Вт. Кроме того, мы не учитываем, что в Iridium используется 4 канала управления от КА до абонента для символьной и

частотной синхронизации, что связано с тем, что нет когерентной обработки с наличием ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты) на каждый частотный канал. Это конечно упрощает подстройку, так как необходимая частота пользователя выставляется на основе сигнала управления (пилот-сигнала) с необходимым пересчётом по частоте, но ухудшает отношение сигнал/шум. Исходя из такого количества пользователей повтор опроса осуществляется через 90 мсек, при этом отрезок времени на приём и передачу составляет по 8,28 мсек по четыре переключения, а сигнал преамбулы 20,32 мсек (Simplex), что связано с использованием дополнительно отдельно каналов управления для синхронизации из-за сложной обработки QPSK. С учётом передачи и приёма информации в 50 кбит/сек в сжатом виде имеем 414 бит за 90 мсек (в реальности 3,45 кбит/сек в обоих направлениях). Соответственно за 1 сек получаем 4,6 кбит/сек для одного пользователя из 1100. Отметим также, что может использоваться 7-8 слотов передачи, и 7-8 слотов приема, и это позволяет либо уменьшить количество одновременных абонентов с разделением по частоте, но с увеличением мощности на канал $8/3 = 2,6$ Вт, вместо 1,3 Вт, либо здесь используется скорость передачи в 2,3 кбит/сек на абонента с увеличением общего количества обслуживаемых абонентов. При такой обработке переход к временному разделению вместо частотного деления даёт небольшое преимущество в сокращении параллельных каналов обработки, но без повышения чувствительности в отношении сигнал/шум. Для Iridium номинальная импульсная мощность передатчика мобильного устройства абонента составляет в импульсе 7 Вт при скважности 10,9 и потоке информации 50 кбит/сек. В итоге средняя мощность будет порядка 0,64 Вт. Понятно, что мы имеем разницу в мощности между передатчиком АФАР и передатчиком мобильного устройства при наличии одной и той же радиолинии. Для передатчика АФАР хватает 1,3 Вт, а для мобильного устройства абонента требуется 7 Вт в импульсе. Однако это связано с тем, что видимо мощность для лучей КА Iridium имеет регулировку в зависимости от направления, а диаграмма направленности антенны мобильного устройства

не может быть равномерная во всех направлениях и абонент не знает, где находится спутник с которым осуществляется связь, и чтобы обеспечить устойчивый приём, и заложена величина мощности в импульсе 7 Вт. Кроме того, есть причины рассмотренные ниже. Собственно, указанная проблема решается в современных спутниковых системах, таких как One Web и Starlink за счёт навигационных данных, когда луч антенны абонента направляется непосредственно на спутник. Отметим, что мощность излучения одной АФАР с учётом многолучевой диаграммообразующей схемы (ДОС) Батлера составляет 16 дБВт (39,8 Вт). Таким образом, при изначальном передатчике в 8 Вт на каждый из 8 лучей, что составляет 64 Вт, потери в ДОС и из-за разветвления равны $64 \text{ Вт} / 40 \text{ Вт} = 1,6$ раза, и это без учёта потерь связанных с отклонением луча каждой панели до ± 60 градусов. Кроме того, надо учитывать, что использование одновременно на приём $N=8$ лучей приводит к увеличению шумов в $N^{1/2} = (8)^{1/2} = 2,8$ раза и с учётом потерь в ДОС, а они связаны с потерями и на микро полосковое разветвление, имеем $1,6 \times 2,8 = 4,48$ раз ухудшение чувствительности приёмника КА, что, кстати, и оправдывает использование абонентом мощности в 7 Вт, так как из-за потерь получается эквивалентное значение 1,56 Вт. Максимальный коэффициент усиления одной антенны АФАР при $K_{\text{п}}=0,7$ составляет

$$G = 4 \times \pi \times S / (\lambda^2) \times K_{\text{п}} = 217 \text{ (23,4 дБ)},$$

где: $S = 930 \text{ мм} \times 860 \text{ мм}$; $\lambda = 0,18 \text{ м}$.

В реальности конечно меньше и определяется числом элементов многолучевой антенной решётки (МЛАР) умноженным на коэффициент усиления одного элемента. В данном случае один излучатель (патч) имеет коэффициент усиления 4,127 раз (6,16 дБ). Коэффициент усиления одного элемента на практике обычно рассчитывается в присутствии остальных элементов нагруженных на эквивалентную нагрузку.

Величину угла луча антенны по уровню 0,5 можно вычислить по формуле $\alpha = (35500/G)^{1/2} = 12,8$ град [6]. Соответственно лучи имеют жёсткое закрепление за сектором обзора, что и даёт пятно на земле, рисунок 7.

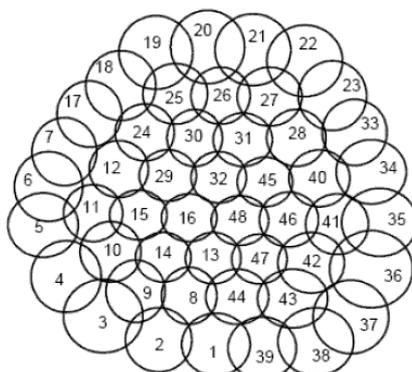


Рисунок 7. Сектор пятна обслуживания многолучевой системы Iridium одного КА.

Отметим следующие недостатки использования конструкции антенн для систем Iridium, Globalstar:

Диаграммо – образующая схема Батлера (для Globalstar это схема Бласса) хоть и обеспечивает многолучевой режим для одновременного обзора и обслуживания всего пятна на Земле, но при этом даёт энергетические потери и сужает диапазон частот (для Iridium это 1616 МГц - 1626,5 МГц, для КА Globalstar в режиме приёма 1610 МГц - 1626,5 МГц, в режиме передачи 2483,5 МГц – 2500 МГц). Полоса пропускания антенн в 10,5 МГц -16,5 МГц исключает использование режима Internet, режима навигации, использование в качестве радиовысотомера и локатора бокового обзора, где требуется полоса пропускания порядка 225-300 МГц. Иными словами КА НССС с многолучевой схемой через частотное разделение дают обслуживание большого количества пользователей в режиме телефонного разговора (ТЛФ) с исключением многофункционального режима. При этом, чтобы увеличить поток информации в многолучевом режиме по схеме Батлера или Бласса в системах Starlink и One Web были вынуждены перейти на диапазон частот превышающий 10 ГГц, чтобы расширить полосу пропускания для потока информации.

Использование многолучевой схемы в одновременном многочастотном режиме излучения исключает возможность повышения к.п.д. в 1,625 раза по энергетическому потенциалу за счёт использования одночастотного режима класса «В», вместо линейного многочастотного режима класса «А» [6].

Расположение панелей на КА НССС Iridium таково, что каждая панель имеет сектор обзора в 120° при двух АФАР на одной панели, что требует в зависимости от несущей частоты отклонения лучей на $\pm 60^\circ$ от нормали панели по азимуту. Это при больших углах отклонения в 60 градусов приводит к снижению энергетического потенциала в 2 раза. Понятно, что управление лучом в зависимости от частоты и даёт вариант узкополосной системы при данных несущих частотах.

Расположение АФАР в Iridium в одной панели (полотне) одного над другим под одним и тем же углом места от нормали панели позволяет расположить АФАР под обтекателем ракеты диаметром порядка 1 метра (ширина панели АФАР 860 мм при длине 1860 мм), однако плоское расположение двух АФАР на одной панели (полотне) также не обеспечивает преимуществ в коэффициенте усиления в направлении пользователей расположенных по углу места и азимуту, так как углы отклонения от нормали совпадают, и при этом при отклонении луча падает эффективная поверхность антенны. При этом исключается вариант использования всего полотна из двух антенн для формирования более узкого луча с повышением энергетического потенциала, так как здесь жёсткая привязка угла отклонения от частоты, нет синфазного режима, и есть

ограничение, связанное с необходимостью формирования одновременно 48 лучей.

Конструктивное решение расположения АФАР на панелях в Iridium и сам принцип работы не позволяет изменять коэффициент усиления антенн за счёт изменения количества синфазно излучающих элементов (патч) и использовать складывающуюся конструкцию с уменьшением масса - габаритных характеристик.

Отсутствует возможность использования увеличения коэффициента усиления энергетического потенциала за счёт усилителей мощности и излучателей АФАР всех панелей при работе, например, в режиме радиовысотомера, локатора бокового обзора в разложенном виде общего плоского варианта, так как конструкция антенн под обтекателем ракеты и в космосе одна и та же. К такому плоскому виду может потребоваться переход и при необходимости увеличения количества обслуживаемых пользователей за счёт дополнительных КА на новых орбитах.

При большом количестве пользователей в многолучевой схеме, из-за привязки лучей к определённому участку местности по углам расположения, энергетический потенциал может упасть в два раза из-за попадания местоположения пользователя на край диаграммы направленности луча. То есть, многолучевая схема с многочастотным режимом разбивки для пользователей не даёт возможности направить луч непосредственно на пользователя, чего можно достичь при последовательном разделении во времени с учётом углового местоположения абонента.

Отсутствует возможность перехода в другую полосу частот при наличии мешающих воздействий с сужением луча и попаданием источника помех в ноль бокового лепестка диаграммы направленности, а также нет возможности увеличения потока информации как в Internet. Работа средств радиоэлектронной борьбы РЭБ на пилот-сигналах исключает работу систем типа Iridium, Globalstar.

Чтобы убрать указанные недостатки при наличии приемлемых масса -габаритных характеристик с увеличением коэффициента усиления, с обеспечением при этом увеличения количества пользователей или потока информации, а также с целью обеспечения многофункционального режима, надо:

Отказаться от многолучевого варианта с наличием диаграммо - образующих схем с использованием узкой полосы пропускания как недопустимого варианта для многофункционального применения из-за узкой полосы пропускания.

Поднять несущую частоту с переходом из L – диапазона (1,6 ГГц) в S – диапазон (2,7 ГГц), что позволяет увеличить полосу пропускания до 300 МГц, а это необходимо для многофункционального использования, хоть и может привести к сокращению габаритных размеров в 1,6875 раза

при том же коэффициенте усиления. При этом в варианте, который рассматривается ниже, потери в 2,85 раза, из-за перехода на более малую длину волны, компенсируются за счёт отказа от диаграммо - образующей схемы (в 1,6 раза), увеличением мощности в 1,625 раз, за счёт использования одночастотного режима обслуживания при тех же энергетических потерях, и увеличением общей площади полотна антенны под обтекателем (по сравнению с Iridium ($1,2 \text{ м}/0,93 \text{ м})^2=1,665$), что необходимо для многофункционального применения. Это даст по сравнению с системой Iridium общий выигрыш в 1,5 раза.

Для использования одночастотного режима, надо применить временное разделение обслуживания абонентов в лучах. Тогда, сочетание временного разделения с изменением направления по углам, в сторону конкретных абонентов будет происходить на максимуме диаграммы направленности. Это позволяет, при последовательном обслуживании во времени абонентов получить выигрыш по сравнению с вариантом многочастотного формирования лучей АФАР и поднять коэффициент усиления антенны с использованием той же площади антенны с переходом к более высокой несущей частоте.

Переход к более высокой несущей частоте расширяет полосу пропускания антенны и даёт возможность многократного использования диапазона частот без мешающих воздействий на другие радиоэлектронные средства из-за отстройки по несущей частоте с возможностью попадания в область наименьшего излучения по уровню бокового лепестка.

Необходимо использовать сокращение сектора углового обзора каждой антенны для увеличения её эффективной площади, как при приёме, так и при передаче, а для этого необходимо увеличить количество антенн по углам обзора.

Следует применить раскладывающуюся в космосе конструкцию антенн для уменьшения размеров в сложенном виде, по примеру солнечных панелей, но с гибким регулированием расположения антенн для многофункционального использования.

Определить такое количество антенн, чтобы их количество при приемлемых масса - габаритных характеристиках обеспечивало функции и характеристики не хуже уже существующих радиосистем.

Получить такой коэффициент усиления антенн с количеством приёмо-передающих модулей, который бы обеспечивал использование энергосберегающего одночастотного режима класса «В», а не многочастотного режима класса «А».

Определить такое количество подАФАР в одном полотне АФАР, чтобы была возможность сохранить необходимый режим работы ранее существующих систем связи с улучшением радиотехнических характеристик при многофункциональном применении.

Выбрать дальность работы с использованием оптимального количества КА с улучшением технико-экономических показателей, для применения в многофункциональных режимах. Например, в качестве локатора бокового обзора требуется высота полёта от 515 км до 650 км (ИСЗ Космос-1500).

Как уже отмечалось и будет показано ниже, из-за необходимости расширить полосу пропускания антенны, требуется переход из диапазона 1,6 ГГц в диапазон 2,7 ГГц. Это сокращает размеры антенны по площади в $(1,6875)^2 = 2,85$ раз при том же коэффициенте усиления. Если допустить, что в одном квадратном полотне АФАР, таких антенн будет четыре, то это позволяет поднять коэффициент усиления общей антенны из 4-х в 4 раза (в Iridium прямоугольное полотно с двумя антеннами). В итоге мы получим увеличение длины стороны по сравнению с шириной полотна Iridium $2/1,6875=1,185$ раз, то есть имеем $(0,93 \text{ м} \times 1,185)=1,1 \text{ м}$. Это вполне приемлемые размеры для образования одного парциального луча, но у Iridium таких парциальных лучей 48, и понятно, что в плоском варианте мы получим немыслимые размеры, которые не уместятся под обтекатель ракеты. Даже в сложенном виде мы будем иметь $48 \times 0,04 \text{ м}=1,92 \text{ м}$ при толщине одного полотна в 4 см. При этом проблема будет и в том, чтобы предусмотреть конструкцию разложения такого полотна, которое в плоском виде будет иметь размеры квадрата с длиной 26,4 метра. Отсюда получить выигрыш, с одной стороны, невозможно без складывающейся конструкции антенн под обтекателем ракеты, а с другой стороны, количество антенн должно обеспечивать оптимальное конструктивное решение, связанное с расположением антенн, их наклоном, повышением коэффициента усиления в сочетании со специальным индивидуальным обслуживанием каждого абонента. При этом желательно использовать временное разделение для одночастотного энергосберегающего режима класса «В», с выставлением узкого луча в нужном направлении на пользователя по данным от навигационной системы (можно и за счёт углового сканирования узким лучом с целью определения местоположения абонента). Соответственно, конструкция антенн должна быть с использованием излучателей на основе патч-антенн как в системе Iridium. Это позволяет использовать планарное размещение плат (параллельно плоскости антенны) при толщине не более 4 см, вместо «слотового» перпендикулярного размещения плат к плоскости антенны в случае волноводно-щелевых антенн (например, для локатора бокового обзора TerraSAR-X [7] с толщиной 15 см). При этом патч допускает использование любой поляризации сигнала, что важно для многофункционального режима. Необходимо отметить, что толщина в 4 см в полотне Iridium связана с диаграммо-образующей схемой Батлера, при её отсутствии толщина будет ещё меньше.

Проведём оценку оптимальной несущей частоты антенны с получением максимальной эффективной площади антенны, где ограничение сверху касается использования планарного размещения плат, а ограничение снизу связано с обеспечением необходимой полосы пропускания антенн на основе патч (излучателя) порядка 300 МГц для многофункционального режима

использования КА и размера полотен АФАР при размещении их под обтекателем ракеты.

Так, для учёта влияния среды необходимо с КА принимать навигационные сигналы с разнесением порядка более 200 МГц по несущим частотам. Например, для связи в [8] используется диапазон 2,35 ГГц - 2,55 ГГц (это полоса 200 МГц) с коэффициентом усиления порядка 14,5 дБ при КСВН<1,2, рисунок 8.

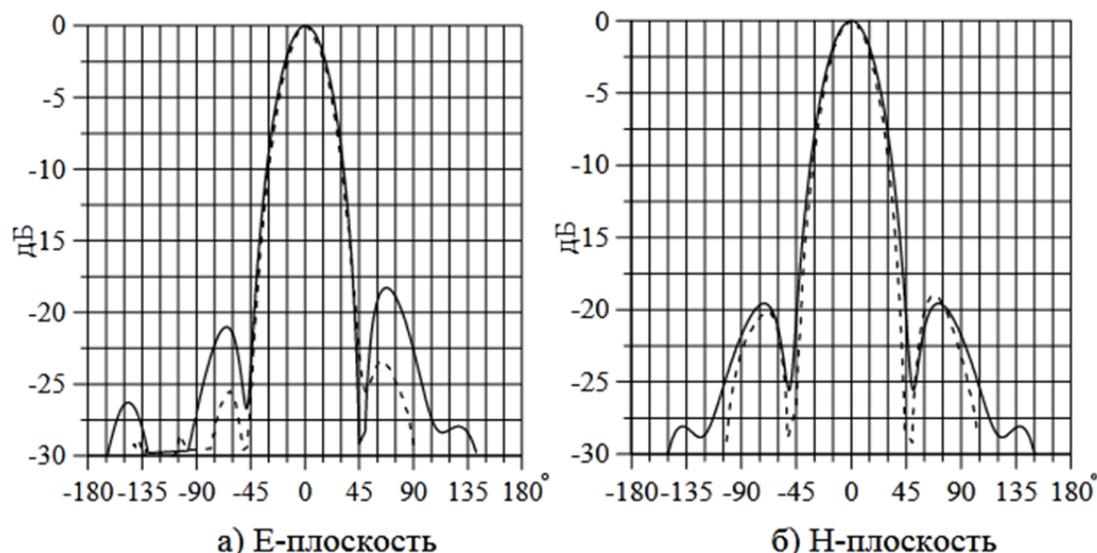


Рисунок 8. Антенна из 4-х элементов патч, моделирование это сплошные линии, штриховые линии это экспериментальные с шириной диаграммы направленности в 34 градуса.

Отметим, что эти значения в [8] соответствуют несущим частотам передатчика системы НССС Globalstar 2,4835 ГГц - 2,5 ГГц, но здесь в Globalstar есть сужение полосы пропускания из-за диаграммы – образующей схемы по схеме Бласса. Напомним, что для системы «Цикада» [9] этот разнос частот составляет 250 МГц (несущие частоты 150 МГц и 400 МГц). Поэтому для более точной оценки влияния среды распространяющегося сигнала желателен переход на диапазон 2,7 ГГц – 3 ГГц с увеличением полосы пропускания, либо использовать иные способы по расширению диапазона. Как известно патч-антенна простейшей конструкции узкополосная (<5%) [10], но специальные технические решения позволяют расширить рабочую полосу частот до 50% и более или строить многодиапазонные антенны. Ширина полосы пропускания патч-антенны сильно зависит от расстояния между лепестком и металлической поверхностью играющей роль «земли». Чем ближе лепесток к «земле», тем меньше энергии излучается и больше запасается в ёмкости и индуктивности и тем выше добротность антенны. Грубо полосу пропускания антенны можно оценить по формуле:

$$\delta f / f_{res} = Z_0 \times d / (2 \times R_{rad} \times W). \quad (1)$$

Где d – расстояние от лепестка до земли, W – ширина лепестка (обычно половина длины волны),

Z_0 – импеданс воздушного промежутка между лепестком и землёй, R_{rad} – сопротивление излучения антенны, Относительная полоса пропускания антенны линейно зависит от её толщины. Характерное значение импеданса воздушного промежутка 377 Ом, а сопротивление излучения 150 Ом, что позволяет упростить формулу:

$$\delta f / f_{res} = 1,2 \times d / W. \quad (2)$$

Для квадратного лепестка на 3 ГГц, W будет 5 см. Толщина антенны в $d=0,5$ см (это обычное соотношение, которое берётся между квадратом лепестка и толщиной антенны, что видно по полосе пропускания антенны, используемой в [8], которая даже меньше { $d / W = 0,2$ [ГГц]/(1,2 × 2,4[ГГц]) = 0,07 }) даст относительную ширину полосы пропускания 12%. Отсюда имеем полосу 360 МГц при 3 ГГц. Напомним, что для ГЛОНАСС разнос частот между несущими частотами L1 и L2 составляет 356 МГц (для GPS порядка 347 МГц). Таким образом, проблема исключения влияния среды решается даже простым переходом в диапазон 3 ГГц. При такой частоте ещё допустимо планарное (параллельное) размещение плат по полотну антенны, в то время как при больших частотах уже требуется слотовое (перпендикулярное к полотну антенны) размещение плат, что даёт увеличение

габаритных характеристик. Однако для антенны [8] мы также можем довести полосу пропускания до 360 МГц, если возьмём соотношение $d/W = 0,36 [ГГц]/(1,2 \times 2,4 [ГГц]) = 0,125$, при этом толщина патч будет порядка 0,78 см. Это в 5 раз меньше, чем толщина панели Iridium. Как будет показано ниже, это может быть необходимо при использовании диапазона от 2,4 ГГц до 2,7 ГГц. Понятно, что мы имеем выбор несущих частот в диапазоне от 2,35 ГГц до 3 ГГц. И

преимущественный выбор будет зависеть от размещения антенны под обтекателем ракеты и общего веса КА. Так, размеры антенны по варианту [8] при наличии в такой конструкции антенны 256 патч, что повышает коэффициент усиления антенны типа [8] (диапазон 2,35 ГГц - 2,55 ГГц) по сравнению с антенной Iridium в (256 патч/53 патч)=4,8 раз, составят $l = 165 [мм] \times 8 = 1,32 м$ (рисунок 9).

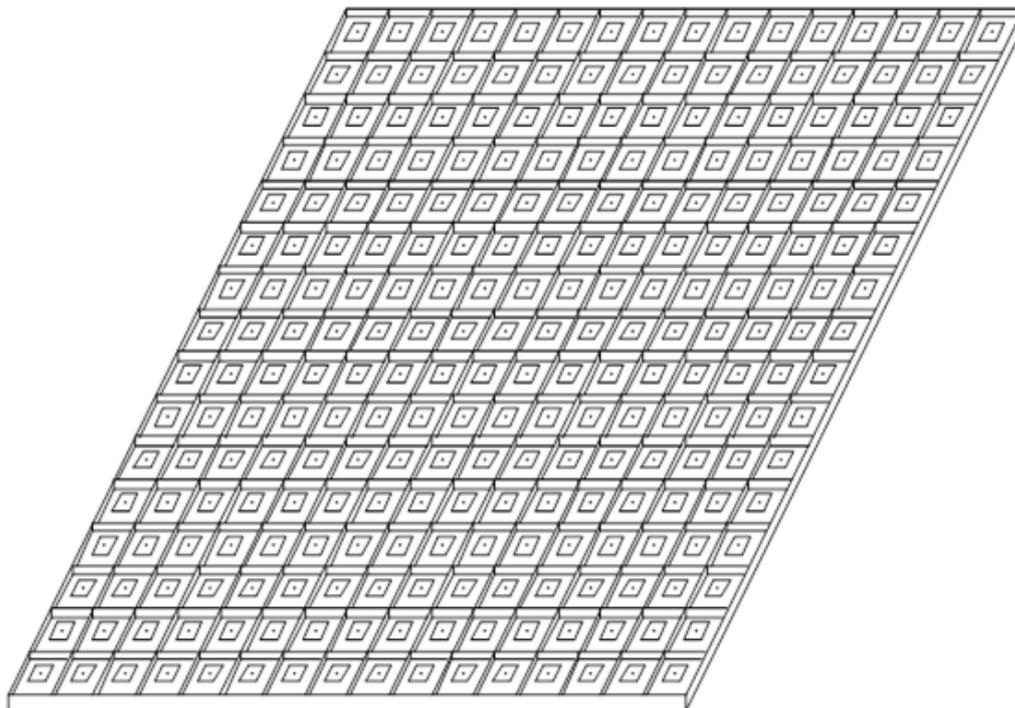


Рисунок 9. Вид АФАР в 3D.

Однако, это может потребовать для некоторых типов ракет специальный новый обтекатель, что может быть нежелательно, хотя размеры антенн КА Globalstar составляют 1,994 м×1,961 м×0,936 м, и так как запуски таких аппаратов осуществляются нашими ракетами, то размеры антенн с квадратом площади 1,32 м×1,32 м вполне допустимы. Отметим, что при взятии за элемент в качестве прототипа антенну [8] при наличии 256 патч, мы должны были бы получить коэффициент усиления 1965,376 (32,9 дБ), и это позволяет уменьшить размеры антенны при использовании диэлектрического наполнителя пространства между лепестком и «землей», за счёт уменьшения при этом коэффициента усиления до 30 дБ. Можно

также перейти в более высокий диапазон несущих частот в районе 2,7 ГГц - 3 ГГц. В этом случае размер антенны при 2,7 ГГц сокращается до $l_1 = 165 [мм] \times 8 \times 2,4 [ГГц] / 2,7 [ГГц] = 1,17 м$. Это, практически совпадает с тем размером, который мы вычислили на основе разницы частот выше при сравнении с площадью антенны Iridium. Кроме того, в АНО «НТИЦ «Техком» г.Москва была создана панель предлагаемой антенны с размерами 1,2 [м]×1,2[м], в полосе частот 2,7-2,9 ГГц и проведены испытания, которые дали коэффициент усиления антенны порядка 30 дБ при ширине диаграммы направленности около 6 градусов, рисунок 10.

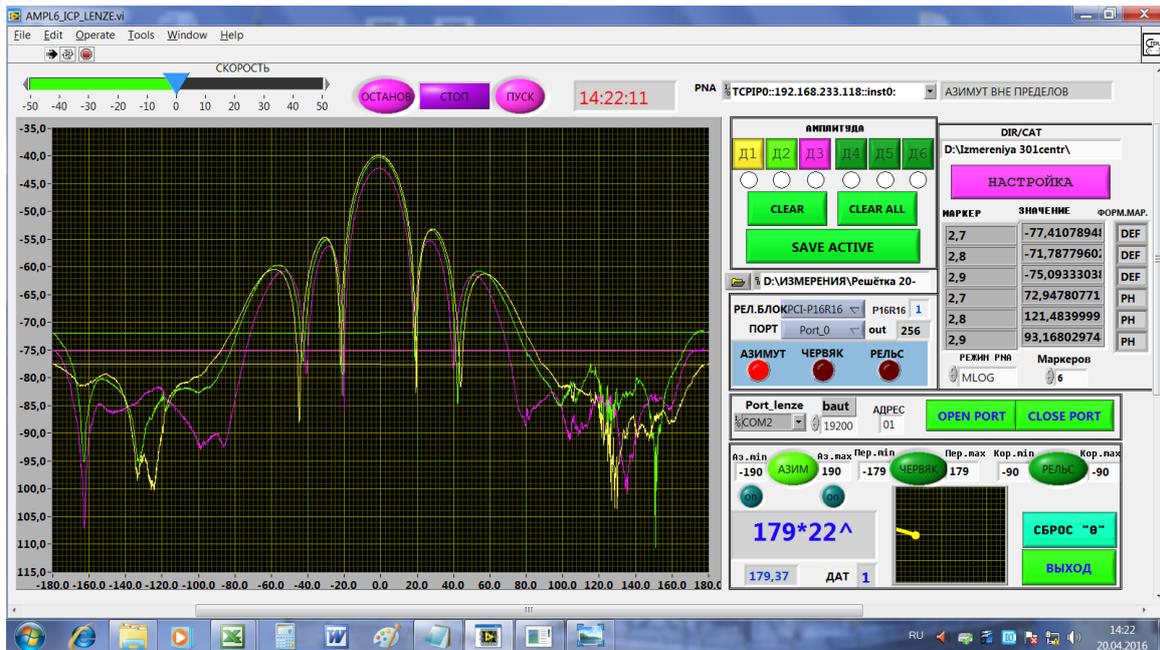


Рисунок 10. Испытания АФАР проведённые в безэховой камере при относительных единицах измерения.

Такой размер антенны уместится под существующие обтекатели большинства ракет для космических запусков. Надо отметить, что под обтекателем ракеты по рисунку 1 располагаются антенны для Globalstar размерами 1,994 м×1,961 м×0,936м, что требует диаметр обтекателя под 2 метра.

Мы исходим из многофункционального режима использования КА НССС, с исключением ухудшения радиотехнических характеристик, поэтому конструкция антенн и их расположение должны выполнять функции, в том числе и такой системы как Iridium. А это означает, что конструкция антенн должна предусматривать одновременное излучение и приём по 48 лучам как в Iridium (по крайней мере, на первом этапе вхождения в связь абонентом с использованием одночастотного режима) без ухудшения радиотехнических характеристик. Кроме того, можно обеспечить с помощью предлагаемой конструкции и межспутниковую связь, которая есть в Iridium, желательно с круговым вхождением в связь по азимуту с другими КА НССС при минимальном угле отклонения луча от нормали не более $\pm 15^\circ$. Так, в системе Iridium есть межспутниковая связь на частоте 23,18 ГГц -23,38 ГГц с полосой 200 МГц. Всего каждый КА, для осуществления межбортовой связи, имеет 4 антенны и 4 тракта радиоэлектронного оборудования. В качестве антенн применены щелевые антенные решетки с усилением 36 дБ, управление диаграммой направленности каждой из антенн осуществляется по азимуту в пределах $\pm 5^\circ$. Понятно, что такие углы отклонения 4 антенн в $\pm 5^\circ$ не обеспечивают режим межспутниковой

связи по всем углам ($\pm 5^\circ \times 4 = \pm 20^\circ$), что сокращает время возможной связи и требует повышения скорости передачи информации. При этом, план частот предусматривает размещение в полосе 200 МГц 8-ми отдельных частотных полос для исключения взаимных помех между каналами. Скорость передачи в каждой линии 25 Мбит/сек (общая скорость передачи информации 200 Мбит/сек). Есть также метод временного разделения каналов, структура кадра неизвестна.

Используя 15 полотен по 256 патч, мы можем получить 60 отдельных парциальных антенн по 64 патч, которые будут эквивалентны 6 антеннам Iridium, которые состоят из 53 патч. Оценим возможности обслуживания пользователей при дальности $D=2500$ км, высоте КА в 650 км, диаметре обслуживаемого пятна $D_n=4852$ км и частоте $f = 2,7$ ГГц ($\lambda = 0,111$ м) с коэффициентом усиления для каждой антенны КА из четырёх в одном полотне (панели) $G_{npd}=251$ (24 дБ). Напомним, что для Iridium получилось 23,4 дБ. Ненаправленная антенна пользователя имеет $G_{npm}=G_{аб}=0,5$ (-3 дБ), считаем, что мощность передатчика КА на один луч $P_{npd}=(8 \text{ Вт} \times 1,6,25)=13$ Вт с учётом повышения к.п.д. за счёт режима класса «В» в одночастотном режиме, и выбираем отношение сигнал/шум $q=20$ (вероятность ошибки для ФКМ сигнала 10^{-5} - 10^{-6} [11], для Iridium в разговорном (телефонном) режиме (ТЛФ) это 10^{-3} - 10^{-4}), при шумовой температуре $T_w=600$ К, соответственно в формуле k – постоянная Больцмана. Необходимая полоса частот мобильного устройства для возможного приёма кодового сигнала навигации (потока информации) вычисляется по формуле:

$$F_{нрм} = P_{нр\delta} \times G_{нр\delta} \times G_{нрм} \times \lambda^2 / [(4 \times \pi)^2 \times q \times k \times T_u \times D^2] = \quad (3)$$

$$= 13 \times 251 \times 0,5 \times (0,111)^2 / [(4 \times \pi)^2 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (2,5 \times 10^6)^2] = 0,123 \text{ МГц.}$$

Теперь вычислим аналогичную полосу пропускания исходя из параметров системы Iridium. При высоте 780 км и диаметре пятна 5185,6 км мы имеем наклонную дальность 2673 км. Потери из-за схемы Батлера составляют 1,6 раза, что даёт выходную мощность в 5 Вт (отметим, что в некоторых обзорах по системе Iridium

предполагается суммарная мощность передатчиков КА в 120 Вт [12], что при 48 лучах составляет 2,5 Вт на луч), частота $f_u = 1,6$ ГГц ($\lambda_u = 0,1875 \text{ м}$), остальные параметры считаем аналогичными. Отсюда имеем:

$$F_{нрми} = P_{нр\delta u} \times G_{нр\delta u} \times G_{нрми} \times \lambda_u^2 / [(4 \times \pi)^2 \times q \times k \times T_u \times D_u^2] = \quad (4)$$

$$= 5 \times 251 \times 0,5 \times (0,1875)^2 / [(4 \times \pi)^2 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (2,673 \times 10^6)^2] = 0,19 \text{ МГц.}$$

Это лучше, чем для случая предлагаемого варианта в 1,5 раза и это связано с меньшей площадью антенны для отдельного парциального луча. Если исходить из мощности 2,5 Вт по [12], то преимуществ у Iridium нет. Кроме того расчёты проводились без учёта многочастотного режима для обслуживания 1100 пользователей. При 8 последовательных слотах и 3-х параллельных каналах по частоте мы получим полосу в 0,063 МГц. Напомним, что для Iridium скорость передачи информации составляет 50 кБит/сек, то есть наши расчёты соответствуют реальным значениям. Соответственно, мы не учитываем тот факт, что у нас лучи на абонента выставляются независимо от частоты и практически на максимум диаграммы направленности, а в случае Iridium абонент может попадать на край ширины диаграммы направленности, что снижает чувствительность в 2 раза. Кроме того при наличии 15 полотен АФАР с делением на 4 подАФАР, мы имеем 60 лучей, из которых 2 подАФАР в каждом полотне АФАР могут быть синфазно объединены при обзоре в зоне максимальной дальности. В этом случае энергетический потенциал такой общей антенны за счёт увеличения коэффициента усиления антенны и мощности может быть увеличен в 4 раза при необходимости. И это означает, что в дальней зоне мы имеем преимущество в 2,67 раза по сравнению с Iridium. Отметим, что вариант работы на 48 лучей, одновременно, будет использоваться только для передачи сигнала от КА и приём сигнала от абонента на КА в начальный момент вхождения в связь в одночастотном режиме. Далее будет использоваться последовательный способ обслуживания во времени по угловым секторам расположения абонентов в виде слотов, что позволяет нам использовать всё полотно АФАР или его половину для формирования узкого луча в нужном направлении на каждого из последовательно обслуживаемых пользователей с учётом необходимой мощности по дальности и сужением луча. То есть, парциальные антенны, в дальней зоне могут объединяться с соответствующими другими ближайшими

парциальными антеннами и даже панелями антенн, что позволяет повысить энергетический потенциал, особенно при большой дальности, в 4-16 раз, и можно довести полосу пропускания до 0,492 МГц - 1,97 МГц, что лучше, чем в системе Iridium. Мощность в импульсе также можно регулировать до необходимой величины с учётом дальности до абонента. Таким образом, преимущество предлагаемой конструкции заключается в том, что мы можем поднять как коэффициент усиления антенны в нужном направлении, так и мощность за счёт правильного распределения с учётом дальности до абонента. Отсюда проигрыш в площади одной парциальной антенны при переходе на более высокую частоту компенсируется отказом от диаграммо - образующей схемы, с выставлением луча непосредственно на абонента, использованием повышения мощности излучения в зависимости от дальности и переходом на последовательный одночастотный вариант обслуживания абонентов с учётом уже площади большей, чем площадь одной парциальной антенны в 2-4 раза.

Напомним, что для Iridium полоса пропускания составляет 50 кГц, что даёт 50 кбит/сек при битовой ошибке 2×10^{-2} при отношении сигнал/помеха 6,1 дБ ($q=4,07$ раза) [12]. Таким образом, даже при использовании одного парциального луча с количеством 64 патч в полотне предлагаемой АФАР мы будем иметь как минимум аналогичные характеристики по полосе пропускания в режиме «дозвона» класса «В», в котором, кстати, не требуется скорость передачи информации даже 2,3 кбит/сек, так как фактически используется режим смс-сообщений.

Теперь вычислим полосу пропускания для межспутниковой связи при расстоянии между спутниками $D_n=4852$ км, частоте $f = 2,7$ ГГц ($\lambda = 0,111 \text{ м}$), при коэффициенте усиления приёмной и передающей антенны $G_{нрм}=G=G_{нр\delta}=251$ (24 дБ), при мощности передатчика КА на один луч $P_{нр\delta}=13$ Вт с учётом повышения к.п.д. за счёт режима класса «В» в одночастотном режиме и отношении сигнал/шум $q=20$ (вероятность ошибки

для ФКМ сигнала 10^{-5} - 10^{-6} [11]), шумовой температуре $T_u=600$ К, k – постоянная Больцмана. Необходимая полоса частот устройства КА для

возможного приёма кодового сигнала навигации (потока информации) вычисляется по формуле:

$$F_{\text{прмка}} = P_{\text{прд}} \times G^2 \times \lambda^2 / [(4 \times \pi)^2 \times q \times k \times T_u \times D_n^2] = \quad (5)$$

$$= 13 \times 251^2 \times (0,111)^2 / [(4 \times \pi)^2 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (4,852 \times 10^6)^2] = 8,19 \text{ МГц.}$$

При этом общий поток от 12 антенн из 60-ти выделяемых для межспутниковой связи составит 98,35 Мбит/сек. Это конечно меньше, чем скорость передачи в 200 Мбит/сек, однако, если учесть передачу по межспутниковой связи в режиме приём-передача от 6000 пользователей одновременно (для Iridium это 1100 пользователей), то в этом случае скорость передачи информации на одного пользователя при скважности 2 будет равняться 8,19 кбит/сек (для Iridium 4,6 кбит/сек), что вполне достаточно при межспутниковой связи по азимуту по всем 360° . Теперь рассмотрим вариант применения межспутниковой связи в случае объединения попарно двух подАФАР (рисунок 11) на каждом полотне при приёме и передаче в дальней зоне. С увеличением при этом мощности в два раза, мы получим энергетический потенциал в 8 раз выше (с учётом объединения двух парциальных антенн при приёме и передаче), что обеспечит возможность передачи 65,52 Мбит/сек. Этот режим мы можем реализовать при той же полосе частот в 38 МГц в режиме QPSK одновременно по 6 направлениям, и это даст общий поток в 393,12 Мбит/сек, а это уже больше, чем поток в 200 Мбит/сек при энергопотреблении 320 Вт. Однако, и это не предел. Если использовать всё полотно на приём и на передачу при межспутниковой связи, то мы получим энергетический выигрыш в $4 \times 4 \times 4 = 64$ раза по сравнению с вариантом по формуле (5) с возможной полосой пропускания в 524 МГц. Реализация такого потока возможна, но при наличии многочастотного варианта при передаче

параллельно на 4-5 каналах с разделением по частоте в режиме QAM, а это снижает к.п.д. до 30%. Соответственно при 3-х направлениях мы будем иметь энергетические потери $3 \times 52 \text{ Вт} / 0,3 = 520 \text{ Вт}$ при потоке $3 \times 524 \text{ Мбит/сек} = 1572 \text{ Мбит/сек}$. При этом на режим связи с абонентами при 48 лучах будет потребление в одночастотном режиме $(48 \times 13 \text{ Вт}) / (2 \times 0,3 \times 1,625) = 640 \text{ Вт}$ при скважности $Q=2$. В сумме получается 1,16 кВт, а это энергопотребление меньше, чем у Iridium (1,4 кВт). При скважности 2 мы будем иметь межспутниковую связь с потоком 786 Мбит/сек. Собственно такой поток можно использовать и для передачи данных от Internet и от локатора бокового обзора.

Таким образом, при многофункциональном использовании предлагаемой конструкции, мы на передачу должны иметь для обслуживания подспутникового пятна 48 лучей, которые могут объединяться при необходимости, и ещё можем иметь дополнительно 12 лучей для реализации межспутниковой связи. Иными словами мы за счёт предлагаемой конструкции можем с учётом межспутниковой связи, причём с гораздо лучшими радиотехническими параметрами, передавать информацию от локатора бокового обзора, радиовысотомера и Internet. В этом случае общее количество лучей равняется 60-ти, с учётом разбиения каждого полотна (панели) АФАР на 4 секционных АФАР с коэффициентом усиления в 24 дБ по рисунку 11, мы будем иметь 15 полотен (панелей) АФАР.

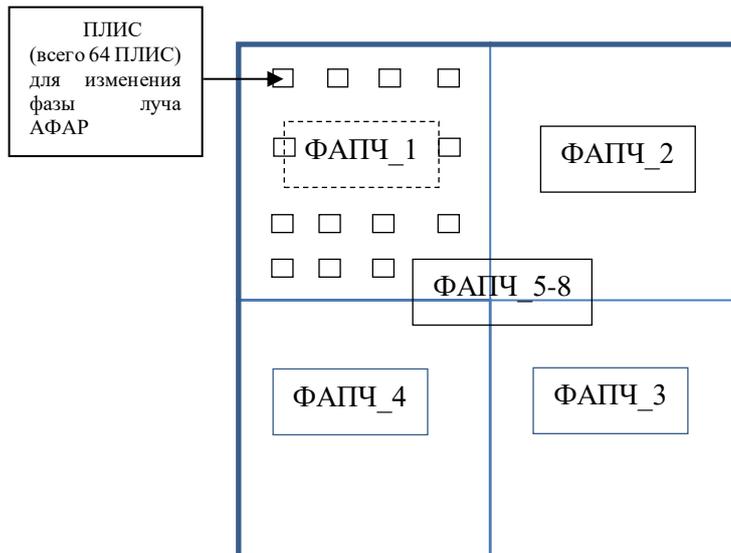


Рисунок 11. Расположение 4-х секционных АФАР (подАФАР) с наличием фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и малоразмерных программно-логических интегральных схем (ПЛИС) для изменения положения луча при работе устройства по способу в режиме Iridium при 60 лучах одновременно с разбиением полотна антенны на 4 зоны по 64 элемента ПАТЧ (всего 256 активных элемента в полотне АФАР).

При этом возможно иметь вариант АФАР всего полотна, вариант по два подАФАР в разной комбинации, вариант 3-х подАФАР и 1 подАФАР в разной комбинации, и вариант 4-х подАФАР с регулированием коэффициента усиления. Следует отметить, что минимальный выбор количества подАФАР в полотне связан с выполнением функций аналогичных системе Iridium без ухудшения характеристик по количеству обслуживаемых абонентов и чувствительности, а также соответствует многочастотному режиму связи со шлюзовой станцией. Максимальное количество подАФАР ограничивается ростом энергетических потерь из-за обработки сигнала, связанное с добавлением на каждую подАФАР АЦП, ЦАП, ПЛИС, балансного модулятора и демодулятора, что и определило выбор в 4 подАФАР. Отсюда вывод: способ складывающейся конструкции антенн с размещением под обтекателем космической ракеты в виде 15 полотен АФАР с возможным разбиением каждого полотна на 4 подАФАР с коэффициентом усиления равным лучу АФАР системы Iridium, не только не ухудшает характеристики предлагаемого КА НССС в сравнении с КА НССС Iridium, но позволяет взять ещё дополнительно функцию межспутниковой связи, и расширить полосу пропускания до 300 МГц. Надо отметить, что использование 4-х подАФАР в одном полотне с одним угловым наклоном определяется необходимостью передачи большого потока информации с разделением по частоте при связи с наземными пунктами

(шлюзовые станции), где обеспечивается необходимый энергетический потенциал и главный фактор - это скорость передачи данных. Полоса в 300 МГц позволяет отстраиваться от других радиозлектронных средств и не мешать им в этом диапазоне частот. Кроме того, появляется возможность повышения энергетического потенциала в нужном направлении и в нужное время в $(4[\text{усиление антенн подАФАР}] \times 4[\text{мощность в луче подАФАР}]) = 16$ раз по сравнению с вариантом системы Iridium, и использовать гибкое изменение мощности в зависимости от дальности до пользователя с увеличением количества пользователей при применении одночастотного режима излучения (режим класса «В») с увеличением коэффициента полезного действия. Иными словами наше устройство имеет лучшую адаптацию к случаю неравномерного распределения абонентов по поверхности Земли. Таким образом, с учётом размеров Globalstar, мы сохраняем режимы работы КА НССС Iridium с размещением складывающейся конструкции антенн с возможной длиной стороны антенны от 1 м до 1,9 м (диапазон несущих частот от 1,7 ГГц до 3,2 ГГц) под обтекателем корпуса ракеты. При этом конечно оптимум достигается с учётом общего веса КА и получением полосы пропускания для антенны в 300 МГц в многофункциональном режиме при 60 лучах и 15 полотен АФАР с появлением дополнительных преимуществ. В разложенном виде мы будем иметь вид по рисунку 12.

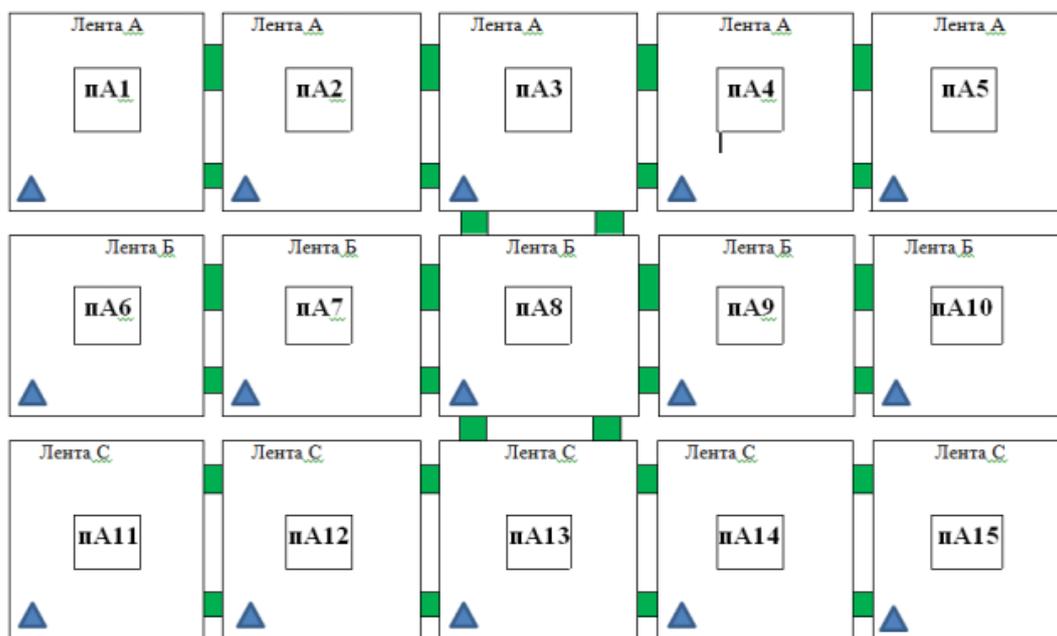


Рисунок 12. АФАР S – диапазона. Вид со стороны электронных блоков.

- 1 – на этом рисунке весь АФАР представлен для наглядности в одну плоскость;
 2 – весь АФАР состоит из 15 одинаковых плоских полотен подАФАР (пА1÷пА15);
 3 – каждое полотно имеет геометрические размеры в соответствии с учётом длины волны;
 4 –  ямоугольник обозначает механическую петлю (шарнир, элемент крепления, поворота и фиксации каждого полотна подАФАР);

Соответственно предлагаемая конструкция имеет сложенный вид при запуске с раскрытием общей апертуры в космосе. Если обеспечить такое раскрытие в виде общего плоского полотна, то при обеспечении фазовой синхронизации по всем 15-ти полотнам можно получить общий коэффициент

усиления антенны порядка
 $251 \times 4 \times 15 = 15060$ (41,8дБ). Такой коэффициент усиления сравним с коэффициентом усиления радиовысотометров [13], приведённых в таблице 1.

Технические характеристики современных спутниковых радиовысотомеров							
Параметр	Seasat-A	Geosat-A	Topex	Poseidon	ERS	MOS-2	Poseidon 2 & 3 (Jason-1,2)
Средняя высота орбиты, км	800	800	1300	1300	800	570	1336
Несущая частота, ГГц	13,5	13,5	13,5/5,3	13,65	13,5	19,8	13,6(Ku)/5,3(C)
Импульсная мощность, кВт	2	0,02	0,02	0,02	0,05	1,2	0,02/0,03
Длительность импульса, мкс	3,2	102,4	102,4	102,4	20	3,2	105,6
Полоса модуляции, МГц	320	320	320	320	330/82,5	320	320/100-320
Частота повторения, КГц	1,02	1,02	4/1	1,7	1,0	1,0	1,68-1,8/0,3-0,45
Ширина ДНА, град.	1,6	2,1	1,1/3,4	1,1	1,3	1,5	1,3/3,4
Точность (высота), м	0,1	0,04	0,035	0,1	0,1/0,4	0,1	0,025...0,035
Точность (волны), м	1,5±10%	1,0±10%	0,4±10%	0,5±10%	0,5±10%	-	0,3±10%
Потребляемая мощность, Вт	165	130	70	70	-	-	70
Масса, кг	94	86,6	-	40	-	-	68 with antenna

Так в соответствии с [6] при ширине диаграммы направленности по азимуту α и ширине диаграммы направленности по углу места β мы будем иметь коэффициент усиления антенны G по формуле:

$$G \approx 35500 / (\alpha \times \beta). \quad (6)$$

Отсюда при ширине диаграммы направленности в 1,6 градуса по азимуту и углу места (Seasat-A), мы имеем коэффициент усиления радиовысотомера $G_p=13867$ (41,4 дБ). Таким образом, нам желательно иметь не фиксированный раскрыв в виде «гармошки» для замещения функций системы Iridium, а допустить раскрыв с изменением расположения полотен в зависимости от требуемого режима работы для увеличения общего коэффициента усиления антенны при

синфазном излучении. Однако, если сравнивать предлагаемый вариант с радиовысотомером типа Seasat-A, то функция радиовысотомера не требует полного разложения антенн предлагаемого КА в общую плоскость. Здесь будет достаточно использовать для функций радиовысотомера одно нижнее полотно.

Действительно, при мощности радиовысотомера Seasat-A $P_p=2$ кВт, ширине ДНА АФАР $1,6^\circ$ ($G_p=13867$ или 41,4 дБ), $f_p=13,5$ ГГц ($\lambda_p=0,022221$ м), вычислим необходимую полосу пропускания F_p для разрешения объектов размером $\sigma=1$ м², при дальности $D_p=800$ км, скважности $Q_p=306$, отношении сигнал/шум $q=20$ (вероятность ошибки для ФКМ сигнала $10^{-5}-10^{-6}$, шумовой температуре $T_w=600$ К, k – постоянная Больцмана:

$$F_p = P_p \times G_p^2 \times \lambda_p^2 \times \sigma / [(4 \times \pi)^2 \times Q_p \times q \times k \times T_w \times D_p^4] = \quad (7)$$

$$= 2000 \times 13867^2 \times (0,022221)^2 \times 1 / [(4 \times \pi)^2 \times 306 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (0,8 \times 10^6)^4] =$$

$$= 0,0579 \text{ Гц}.$$

Это означает, что получается узкополосная система, и это требует накопления импульсов.

Для нашего варианта при мощности $P_{p1} = 256 \times 7 \text{ Вт} = 1792 \text{ Вт}$ при дальности

$D_{p1}=650$ км, ширине ДНА АФАР 6° с усилением $G_{p1}=986$ раз (29,93 дБ), $f_{p1}=2,7$ ГГц ($\lambda_{p1}=0,111$ м), при той же скважности и другими такими же параметрами имеем полосу пропускания:

$$\begin{aligned}
 F_{p1} &= P_{p1} \times G_{p1}^2 \times \lambda_{p1}^2 \times \sigma / [(4 \times \pi)^2 \times Q_p \times q \times k \times T_{u1} \times D_{p1}^4] = \\
 &= 1792 \times 986^2 \times (0,111)^2 \times 1 / [(4 \times \pi)^2 \times 306 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (0,65 \times 10^6)^4] = \\
 &= 0,015 \text{ Гц}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Это означает, что в предлагаемом варианте мы при 1,792 кВт в импульсе имеем проигрыш в 3,8 раза по сравнению с Seasat-A. Однако, если скважность для предлагаемой конструкции будет равна $Q_{p1}=306/3,8=80,5$ (это вполне допустимо, так как скважность в других радиовысотомерах может доходить и до $Q=3$, а предлагаемая скважность в 7,4 раза лучше, чем скважность для мобильного устройства Iridium в $Q_I=10,9$), то характеристики по полосе пропускания будут одинаковы и равны 0,0579 Гц. При этом, средняя мощность на нижнее полотно будет 22,27 Вт, при допустимой средней мощности на полотно АФАР в режиме Iridium $13 \text{ Вт} \times 4/2 = 26 \text{ Вт}$. Однако, если обеспечить режим синхронизации по несущей частоте и фазам элементов патч, для 3-х нижних полотен КА, то мы даже можем поднять коэффициент усиления общей антенны состоящей из 3-х полотен с учётом того, что два соседних крайних полотна имеют отклонение от горизонтали среднего полотна $\pm 30^\circ$ и с сокращением их площади в 0,866 раз. В этом случае общая площадь антенны и коэффициент усиления возрастёт $2 \times 0,866 + 1 = 2,732$ раза с получением общей ширины диаграммы направленности $2,1961^\circ \times 6^\circ$, при этом мощность от трёх АФАР возрастёт в 3 раза. Отсюда при скважности $Q_p=306$ получим выигрыш в 2,15 раз, а при скважности $Q_{p1}=80,5$ имеем полосу пропускания при работе в варианте нашей конструкции 0,4745 Гц, что лучше варианта Seasat-A. в 8,196 раза. Это позволит увеличить чувствительность во столько же раз. Таким образом, мы даже в варианте «гармошки» можем использовать режим радиовысотомера с улучшенными характеристиками, не прибегая к конструктивным изменениям.

Рассмотрим теперь вариант возможности предлагаемого устройства антенн АФАР КА НССС в режиме локатора бокового обзора TerraSAR-X. У него высота орбиты 514,8 км и масса 1209 кг,

$$\begin{aligned}
 F_a &= P_a \times G_a^2 \times \lambda_a^2 \times \sigma / [(4 \times \pi)^2 \times Q_a \times q \times k \times T_{u1} \times D_a^4] = \\
 &= 2688 \times 46772^2 \times (0,03125)^2 \times 1 / [(4 \times \pi)^2 \times 6,66 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (0,916 \times 10^6)^4] = \\
 &= 46,8 \text{ Гц}.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Для предлагаемого варианта, при дальности $D_a=916$ км, частоте $f_{a1}=2,7$ ГГц ($\lambda_{a1}=0,111$ м), при той же общей мощности передатчика в

отклонение нормали к плоскости АФАР от надира $33,8^\circ$. Иными словами от горизонтальной поверхности Земли отклонение $33,8^\circ$. Для АФАР угол сканирования по углу места $\pm 20^\circ$, а по азимуту $\pm 0,75^\circ$. Время работы составляет 10 минут за один виток при потребляемой мощности 800 Вт. Интервал повторной съёмки составляет 2,5 суток. Для связи в TerraSAR-X используется высокоскоростная линия передачи X - диапазон 300 Мбит/сек. При этом для АФАР размерами $4784 \text{ м} \times 754 \text{ мм} \times 150 \text{ мм}$ используются 12 панелей по 32 излучающих волноводно-щелевых элемента с вертикальной и горизонтальной поляризацией (всего 384 элемента с приёмо-передающими модулями по 6-7 Вт с переключением на вертикальную и горизонтальную поляризацию с суммарной мощностью излучения с учётом потерь 2260 Вт). Ширина ДНА АФАР при равномерном распределении поля по раскрытию составляет $0,33^\circ$ по азимуту и $2,3^\circ$ по углу места (усиление 46772 раз или 46,7 дБ), это в 3 (4,9 дБ) раза выше, чем в случае полного раскрытия АФАР полотен в плоском предлагаемом варианте по рисунку 12. Однако, вычислим необходимую полосу пропускания F_a для разрешения объектов размером в $\sigma = 1 \text{ м}^2$ для TerraSAR-X, при коэффициенте усиления антенны $G_a=46,7$ дБ (46772 раз), при дальности $D_a=916$ км (если исходить из угла отклонения луча по углу места в 20 градусов от нормали к полотну), частоте $f_a=9,6$ ГГц ($\lambda_a=0,03125$ м), при мощности передатчика в импульсе $P_a=7 \text{ Вт} \times 384 = 2688 \text{ Вт}$, скважности $Q_a=6,66$, отношении сигнал/шум $q=20$ (вероятность ошибки для ФКМ сигнала $10^{-5}-10^{-6}$, шумовой температуре $T_{u1}=600$ К, k – постоянная Больцмана. Вычисление проведём по формуле:

импульсе $P_a=0,7 \times 3840 = 2688 \text{ Вт}$, коэффициенте усиления $G = 251 \times 4 \times 15 = 15060$ (41,8 дБ), скважности $Q_a=6,66$, полоса пропускания составит:

$$F_{\text{н1}} = P_{\text{т}} \times G^2 \times \lambda_{\text{н1}}^2 \times \sigma / [(4 \times \pi)^2 \times Q_{\text{т}} \times q \times k \times T_{\text{ш}} \times D_{\text{т}}^4] = \quad (10)$$

$$= 2688 \times 15060^2 \times (0,1111)^2 \times 1 / [(4 \times \pi)^2 \times 6,66 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (0,916 \times 10^6)^4] =$$

$$= 61,3 \text{ Гц.}$$

То есть, фактически для разрешения объекта в 1м² предлагаемый вариант конструкции антенн в виде общей плоской антенны, при тех же параметрах мощности и дальности не уступает варианту TerraSAR-X. Кроме того, на каждый излучатель в антеннах у нас приходится всего 0,7 Вт, что позволяет нам в соответствующие короткие промежутки времени для обзора необходимых участков местности повысить мощность в 10 раз с возможным увеличением дальности до объектов до

1628 км. Дополнительная энергия для этого может быть взята при использовании поверхности 14-ти полотен антенн с обратной стороны для солнечных панелей. Собственно и для работы в режиме радиовысотомера за счёт добавочных солнечных батарей мы также имеем преимущество в возможности повышения мощности.

Ниже, в таблице 2 приведены характеристики солнечных батарей (СБ) [14].

Таблица 2.

Характеристики перспективных СБ

Параметр	Spectrolab (перспективный уровень)	ФЭП AZUR каркас ОАО «РКК «Энергия им. С.П. Королева»	ФЭП AZUR каркас ОАО «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева»	ФЭП AZUR каркас НПО им. С.А. Лавочкина, ОНПП «Технология»
КПД ФЭП, %	28.2*...29.5	29.1		31
Удельная масса ФЭП, кг/м ²	0.732			0.732 (0.453**)
Удельная мощность на начало САС по ФЭП, Вт/м ²	330 (366)	356	360	381
Удельная мощность на 15 лет САС по ФЭП, Вт/м ²	260 (290)	279	272	293
Удельная масса БФ, кг/м ²	1.75	1.60	1.5...1.6	1.33...1.40 (~1.0**)
Удельная масса каркаса, кг/м ²	0.6...0.8*	>1.0	0.7	0.4...0.5
Удельная масса СБ (БФ+каркас), кг/м ²	2.35...2.55	>2.6	2.2...2.3	1.73...1.90 (<1.5**)
Удельная масса СБ (БФ+каркас), кг/кВт	8.1...8.8	-	7.58...7.93	5.1
Примечания: Характеристики даны без учета массы узлов раскрытия, зачеховки и транзитных кабелей *-ориентировочное значение **-в случае применения ФЭП толщиной 80 мкм				

При удельной мощности 293 Вт/м², при половине антенн освещённых солнцем (7 антенн×1,44 м²), мы получим энергетическую прибавку в 2953 Вт. Напомним, что для работы TerraSAR-X в течении 10 минут за один виток требуется 800 Вт.

Однако при ведении боевых действий необходимо дистанционное зондирование Земли в непрерывном режиме во времени, особенно в зоне непосредственного соприкосновения. В этом случае можно применить зондирование, когда КА передаёт сигналы зондирования, а приём сигнала зондирования осуществляется на антенну ЛА или

аэростата в режиме барражирования в зоне фронта [15]. При этом привязка по местности осуществляется по данным навигации и работа только на приём обеспечивает скрытность. В этом случае общая дальность от КА до зоны зондирования может достигать порядка $D_{\text{лз}}=2500$ км, что соизмеримо с зоной полного покрытия, а от ЛА (аэростата) до зоны зондирования $D_{\text{ла}}=25$ км. Для нашего варианта при мощности $P_{\text{р1}} = 256 \times 7 \text{ Вт} = 1792 \text{ Вт}$, ширине ДНА АФАР 6° с усилением $G_{\text{р1}}=986$ раз (29,93 дБ) при приёме на ЛА (или аэростате) и передаче от КА

необходимую полосу пропускания можно вычислить по формуле:

$$F_{\text{ла}} = P_{\text{р1}} \times G_{\text{з1}}^2 \times \lambda_{\text{з1}}^2 \times \sigma / [(4 \times \pi)^2 \times Q_{\text{л}} \times q \times k \times T_{\text{ш}} \times D_{\text{лз}}^2 \times D_{\text{ла}}^2] =$$

$$= 1792 \times 986^2 \times (0,1111)^2 \times 1 / [(4 \times \pi)^2 \times 6,66 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (2,5 \times 10^6)^2 \times (2,5 \times 10^4)^2] = 38,46 \text{ Гц.} \quad (11)$$

Данный режим обеспечивает дистанционное зондирование Земли с аналогичным накоплением зондирующих импульсов по мере перемещения КА по орбите при средней мощности излучения 271,5 Вт. При этом, режим разнесения передачи и приёма при зондировании Земли позволяет работать с накоплением импульсов зондирования в течение нескольких минут при использовании одномоментно одного полотна АФАР на КА со сменой полотен для выставления в одно и то же место по мере движения КА в варианте реального масштаба времени. Это повышает отношение сигнал/шум за счёт накопления сигнала (по сравнению с TerraSAR-X нам требуется повысить накопление всего в 1,2 раза). Надо отметить, что в США провели эксперимент с применением сигналов GPS для дистанционного зондирования Земли с разнесением приёмника и передатчика, но при этом получалась низкая разрешающая способность из-за низкой скорости фазовой манипуляции, которая должна быть не менее 150 Мбит/сек. Однако с учётом того, что время распространения сигнала зависит от частоты и имеет значение 3-4 метров, можно повысить разрешающую способность до необходимой величины используя при ФКМ сигнале в 40-50 Мбит/сек несущие частоты в пределах полосы пропускания антенны порядка 300 МГц с наложением и суммированием рельефа местности от сигналов разных несущих частот. Сочетание

передаваемых ФКМ – сигнала и ЛЧМ сигнала, вместе или последовательно, а также использование нескольких точек приёма сигнала, также улучшит разрешающую способность.

Теперь покажем преимущество предлагаемого варианта для режима Internet по сравнению с вариантом OneWeb.

Мы видим, что последние несколько лет на рынке спутниковой связи особое внимание уделяется системам, реализуемым на основе многоручевых низкоорбитальных спутников. Среди этих проектов выделяется проект LEO-HTS OneWeb. Здесь предполагается высота орбиты 1200 км и многосигнальный режим со скоростью потоков информации в режиме TDMA(FDMA) от 1,2 до 20 Мбит/сек.

В [16] указано, что граница зоны обслуживания одного спутника OneWeb определяется минимальным углом места абонентского терминала в 55 град. Это соответствует видимости Земли со спутника конуса с углом раскрытия 57,7 град. Диаметр зоны радиовидимости спутника с Земли в этом случае составляет примерно 1400 км. Используются Ku - диапазон (10,7–18 ГГц) и Ka - диапазон (26,5–40 ГГц). Антенна Ku-диапазона формирует близкую к квадрату 48×48 град. угловую зону обслуживания по уровню усиления - 3 дБ от максимума, состоящую из 16 абонентских лучей, Рисунок 13.

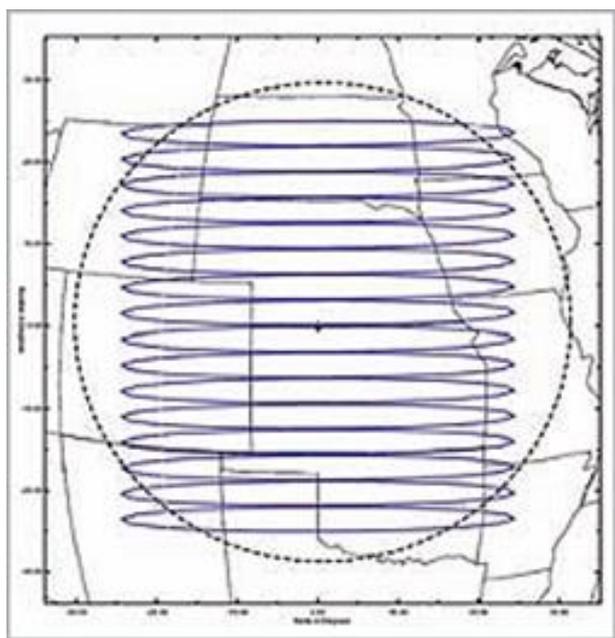


Рисунок 13. Расположение лучей спутника OneWeb.

Из рисунка 13 видно, что при весе самого спутника в 147,7 кг, антенный блок должен иметь простейшую конструкцию, что достигается как видно из рисунка 2 использованием щелевой антенной решётки с управлением лучом за счёт несущей частоты (можно предположить, что используется схема Бласса, как в Globalstar с 16-ю лучами).

Предполагается, что абонентские терминалы в системе OneWeb будут иметь размер антенн 0,3–0,75 м. Ширина ДН-антенны 0,3 м по приёму составляет примерно 6 град., а по передаче примерно 7,5 град. по уровню - 3 дБ. Естественно, что на абонентский терминал, расположенный в зоне пересечения лучей, будут воздействовать помехи от своих спутников, а множество таких терминалов будет генерировать помехи для спутников в соседних орбитальных плоскостях. Этот процесс будет усиливаться по мере удаления от экватора.

Система OneWeb заявлена как система, предоставляющая услуги на глобальной основе. В техническом плане это означает, что в любой момент времени в любой точке поверхности Земли для наземного абонента должен быть доступен хотя бы один спутник системы, который, в свою очередь, имеет доступ к наземной станции сопряжения.

Так как в системе не используются межспутниковые линии связи, то для обеспечения "глобальности" зоны обслуживания потребуется развернуть достаточно большое число шлюзов. Проведём энергетический расчёт по системе связи OneWeb, так как компания собирается развернуть на орбите сеть из 600 аппаратов.

После развёртывания сети компания планирует начать предоставление услуг высокоскоростного доступа в сеть в глобальном масштабе на частотах Ku - диапазон (10,7–18 ГГц) и Ka - диапазон (26,5–40 ГГц).

При расчёте учтём, что антенна Ku-диапазона формирует близкую к квадрату 48×48 град.

угловую зону обслуживания по уровню усиления - 3 дБ от максимума, состоящую из 16 абонентских лучей (собственно зона обслуживания спутника OneWeb аналогична зоне обслуживания спутника Globalstar с разницей в диапазоне частот и коэффициенте усиления). Диаметр зоны радиовидимости спутника с Земли в этом случае составляет примерно 1400 км. Высота 1200 км. Без учёта защитных частотных интервалов емкость одного спутника OneWeb составляет 3600 МГц для прямых каналов и 2000 МГц для обратных каналов, т.е. в сумме $\Delta F = 5600$ МГц. Требуемая полоса на один парциальный луч $3600 \text{ МГц}/16=225$ МГц. В режиме QPSK это позволит передать 450 Мбит/сек. При 16 парциальных лучах это составит 3,6 Гбит/сек. Общий объём составит $3,6 \text{ Гбит/сек} \times 600$ спутников=2160 Гбит/сек.

Учтём также, что абонентские терминалы в системе OneWeb будут иметь размер антенн 0,3–0,75 м. Ширина ДН-антенны 0,3 м по приёму составляет примерно 6 градусов, а по передаче примерно 7,5 град. по уровню - 3 дБ.

Считаем, что длина волны $\lambda_o=0,01875$ м. (1,875 см) - 16 ГГц.

Коэффициент усиления приёмной (передающей) антенны спутника:

$$G_{\text{прдо}} = 35500/(48 \times 48/16) = 246,53 \text{ (23,9 дБ)}.$$

Коэффициент усиления приёмной антенны абонента:

$$G_{\text{прмаб}} = 35500/(6 \times 6) = 986,11 \text{ (29,93 дБ)}.$$

Коэффициент усиления передающей антенны абонента:

$$G_{\text{прдаб}} = 35500/(7,5 \times 7,5) = 631,1 \text{ (28 дБ)}.$$

Мощность передатчика спутника:

$$P_{\text{прдсп}} = 5 \text{ Вт, на один парциальный луч из 16.}$$

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \times 10^{-23}$ (тепловой шум).

Шумовая температура $T = 600$ (по Кельвину).

Отношение сигнал/ шум $q=20$.

Максимальная дальность $D_o = 1389$ км.

Полоса пропускания для потока информации вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} F_{\text{прмо}} &= P_{\text{прдсп}} \times G_{\text{прдо}} \times G_{\text{прмаб}} \times \lambda_o^2 / [(4 \times \pi)^2 \times q \times k \times T_u \times D_o^2] = \\ &= 5 \times 246,53 \times 986,1 \times (0,01875)^2 / [(4 \times \pi)^2 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (1,389 \times 10^6)^2] = \\ &= 8,49 \text{ МГц}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для длины волны с частотой в 10,7 ГГц ($\lambda_{o1}=0,028$ м) имеем:

$$\begin{aligned} F_{\text{прмо}} &= P_{\text{прдсп}} \times G_{\text{прдо}} \times G_{\text{прмаб}} \times \lambda_{o1}^2 / [(4 \times \pi)^2 \times q \times k \times T_u \times D_o^2] = \\ &= 5 \times 246,53 \times 986,1 \times (0,028)^2 / [(4 \times \pi)^2 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (1,389 \times 10^6)^2] = \\ &= 18,9 \text{ МГц}. \end{aligned} \quad (13)$$

Приведённый нами расчёт близок к заявленной скорости потока информации в 20 Мбит/сек на один частотный канал, однако чтобы получить необходимый поток информации в 3,6

Гбит/сек на один парциальный луч требуется иметь как минимум от 11 до 12 параллельных частотных каналов на один луч из 16, что соответствует полосе в 225 МГц. В этом случае мощность излучения на

один луч должна составлять как минимум 55 Вт. Отсюда следуют выводы:

1) Приведённый расчёт убедительно показывает, что спутники OneWeb для обеспечения работы в указанном выше режиме должны иметь мощность в 11-12 раз выше при 11-12 частотных параллельных каналах в многопользовательском режиме (176 пользователей на КА с потоком в 20 Мбит/сек), и составлять в одном луче как минимум 55 Вт (без учёта поглощения в среде), что в итоге составит 880 Вт с учётом 16 лучей (требуется источник питания с учётом к.п.д. 30% в 2,93 кВт). Такой непрерывной мощности нет в спутниках Iridium (192 Вт), или Globalstar (409,5 Вт), но масса КА Iridium 689 кг, а масса КА Globalstar 550 кг. Наибольшую мощность потребления в 800 Вт при работе в 10 минут за виток даёт только TerraSAR-X при массе 1290 кг, и эта масса, очевидно, связана с аккумуляторными батареями. При этом Iridium имеет массу 689 кг и высоту орбиты 780 км. С учётом разницы мощности в 2 раза и высот почти в 2 раза, масса спутников OneWeb не может быть меньше 689 кг для достижения заявленного потока информации. Это никак не соответствует заявленным характеристикам по массе 147,7 кг или здесь должны быть некие новые солнечные батареи с очень высоким к.п.д., а также аккумуляторные батареи или другие накопители энергии с малым весом. Для Starlink масса составляет 240 кг с учётом того, что предполагается запустить 12000 спутников. Эти данные для диапазона Ku.

2) Если подставим в формулу расчёта длину волны $\lambda_{\max}=0,001171875$ м Ка – диапазона, то характеристики будут ещё хуже, что даст уменьшение полосы с 19 МГц до 7,5 МГц, и это приводит к существенному снижению скорости обмена информацией. Именно поэтому для Internet количество спутников Starlink в проекте Илона Маска в 20 раз больше, чем спутников OneWeb, и такое количество связано с необходимостью также межспутниковой связи с передачей большого

объёма информации. При этом OneWeb не имеет межспутниковой связи.

3) Заявленное расстояние между опорными станциями (из данных OneWeb) составляет 2500 км, однако, на основании пятна на Земле приведённого выше это расстояние должно быть 1400 км или надо иметь антенну с большой апертурой при приёме на Земле.

Таким образом, попытка обеспечить снижение веса спутника до 147,7 кг при увеличении потока информации по сравнению с Iridium и Globalstar с переходом в диапазон Ка и Ку при увеличении также числа базовых станций и коэффициента усиления антенны абонента не даст результата, так как увеличение скорости передачи информации и выигрыш за счёт коэффициента усиления антенны абонента не компенсируют друг друга в силу того, что ухудшение характеристик связано с переходом в Ка и Ку диапазон с сокращением площади антенн. Отсюда передача информации будет происходить при потоке информации как минимум в 10 раз меньше заявленной, то есть 1-2 Мбит/сек на один частотный канал в случае множества пользователей.

Сравним теперь вариант OneWeb с использованием варианта на основе предлагаемой конструкции. Соответственно в связи с этим стоит вопрос: «Каким образом можно достичь характеристик заявленных OneWeb и при этом обеспечить приемлемое количество спутников с соответствующими массогабаритными характеристиками?».

Проведём расчёты полосы пропускания для предлагаемого варианта конструкции при этом будем полагать, что изменилась только значение длины волны $\lambda_{o2}=0,111$ м. (11,1 см) – 2,7 ГГц, так как у нас при 60 лучах коэффициент усиления каждого луча составляет 24 дБ (251 раз) с увеличением площади антенны. Отсюда будем иметь полосу пропускания по формуле:

$$F_{\text{прмо}} = P_{\text{прдсп}} \times G_{\text{прдо}} \times G_{\text{прмаб}} \times \lambda_{o2}^2 / [(4 \times \pi)^2 \times q \times k \times T_{\text{ш}} \times D_o^2] = \quad (14)$$

$$= 5 \times 251 \times 986,1 \times (0,111)^2 / [(4 \times \pi)^2 \times 20 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 600 \times (1,389 \times 10^6)^2] =$$

$$= 302 \text{ МГц.}$$

С учётом того, что мы рассчитываем в режиме BPSK передавать 38 Мбит/сек, то мы имеем энергетический запас в 7,9 раза (9 дБ). Используя этот энергетический выигрыш мы можем снизить требования к приёмной антенне абонента на 9 дБ, что соответствует приёмной антенне в $G_{\text{прмаб}} = 126$

(21 дБ) вместо 986,1 (29,93 дБ). Вычислим необходимую площадь приёмной антенны абонента по формуле, которую мы использовали для оценки коэффициента усиления антенны Iridium при $Kn=0,7$:

$$S_{\text{прмо}} = G_{\text{прмаб}} \times \lambda_{o2}^2 / [(4 \times \pi) \times Kn] = 126,76 \times (0,11)^2 / [(4 \times \pi) \times 0,7] = 0,177 \text{ м}^2. \quad (15)$$

Это соответствует стороне квадрата длиной 0,42 м. Напомним, что абонентские терминалы в системе OneWeb будут иметь размер антенн диаметром 0,3–0,75 м. То есть, площади антенн

абонентов OneWeb и предлагаемой конструкции соизмеримы, коэффициенты усиления антенн изменены таким образом, что у нас коэффициент усиления антенны КА выше, а выигрыш связан с

увеличением длины волны. При этом одновременный поток от 60 лучей составит 2,28 ГГбит/сек, а общая мощность излучения в непрерывном режиме составит 300 Вт, что не превышает мощности излучения КА НССС Iridium и Globalstar также в непрерывном режиме. Иными словами, мы используем увеличение площади антенн в космосе из-за увеличения длины волны, что при прочих равных условиях позволяет добиться потока на одного абонента в 38 Мбит/сек вместо 19 Мбит/сек. При использовании площади антенны абонента со стороной 0,75 метра, мы будем иметь коэффициент усиления антенны абонента в 3,16 раз больше при $G_{\text{прмаб1}}=400,8$ (26 дБ). Это означает, что мы можем использовать для передачи не режим BPSK, а режим QAM с трёхкратным увеличением потока информации до 114 Мбит/сек на одного абонента из шестидесяти. В этом случае на один КА будет приходиться поток информации 6,84 Гбит/сек, или 3,42 Гбит/сек на передачу при 60 абонентах по 114 Мбит/сек. При приёме сигналов на КА от абонентов мы можем использовать многоканальный приём с разнесением по частоте по 8-ми каналом (8 ФАПЧ) в диапазоне полосы пропускания 304 МГц (для OneWeb это 225 МГц). В этом случае при приёме на КА по 15 антеннам при 8-ми каналах и при сигнале QAM с наличием 114 Мбит/сек мы получим поток 13,68 Гбит/сек (при скважности 2 поток на приём составит 6,84 Гбит/сек). В общей сумме при скважности 2 мы будем иметь поток 10,26 Гбит/сек. Если исходить из характеристик КА OneWeb на приём в 2 Гбит/сек, а на передачу 3,6 Гбит/сек с учётом обслуживания такого же количества пользователей, то мы можем изменить параметры по скважности, и на приём иметь скважность $Q_{\text{пр}}=6,84$ с приёмом 2 Гбит/сек, а на передачу мы будем иметь скважность $Q_{\text{пер}}=1/(1-1/Q_{\text{пр}})=1,17$ и передавать 5,84 Гбит/сек. Отсюда можно выделить 2,24 Гбит на межспутниковую связь при 3,6 Гбит/сек на передачу и 2 Гбит/сек на приём как у OneWeb. Понятно, что поток на приём в 2 Гбит/сек может передаваться через межспутниковую связь. Таким образом, мы полностью сохраняем возможности OneWeb, но при этом у нас есть ещё и межспутниковая связь. Однако мы должны обслуживать подспутниковое пятно с дальностью не 1389 км, а с дальностью 2500 км, что требует повышения мощности передатчика с 5 Вт до 16,2 Вт, то есть в 3,24 раза. В этом случае с использованием одночастотного режима в классе «В» (при передаче) мы можем обеспечить Internet в подспутниковом пятне при дальности в 2500 км в виде «гармошки», а не в плоском варианте с дальностью 1389 км. Таким образом, для передачи абонентам 3,6 Гбит/сек нам потребуются использование 36,98 лучей, а для межспутниковой связи 23,02 лучей, где остатки после запятой говорят о попеременном использовании во времени. Однако полоса пропускания информации по межспутниковой связи на дальности 4852 км при мощности 16,2 Вт в формуле (5) не будет превосходить 10 МГц. А это означает, что реальный

поток по межспутниковой связи составит 196 Мбит/сек при использовании на передачу и приём парциальных антенн в 24 дБ. Однако поток может быть увеличен, если при приёме использовать антенну всего полотна в 30 дБ, а не подАФАР в 24 дБ. Тогда поток может быть повышен до 40 Мбит/сек от каждой из 4 передающих антенн с наличием 4 каналов разделённых по частоте в полосе 160 МГц. Это даст поток уже 786 Мбит/сек. Ясно, что, чтобы добиться необходимых 114 Мбит/сек на приём по межспутниковой связи надо либо поднять мощность передачи ещё 2,85 раз до 46,17 Вт, либо использовать синфазный приём не от одного полотна, а от 2 или 3 полотен с повышением коэффициента усиления общей приёмной антенны 2,85 раза (4,6 дБ) по аналогии как это предлагалось для повышения характеристик для радиовысотомера. В случае повышения мощности для межспутниковой связи, мощность потребления в импульсе для связи с абонентами при использовании 36,98 лучей составит 599 Вт, при скважности $Q_{\text{прд}}=1,17$, и к.п.д. при одночастотном режиме имеем потребление от питания 1,05 кВт. А мощность потребления в импульсе для межспутниковой связи при использовании 23,02 лучей и 46,17 Вт на луч составит в сумме 1,063 кВт. С учётом скважности и к.п.д. для межспутниковой связи будем иметь потребление от питания 1,863 кВт. В сумме 2913 Вт, и эта величина превосходит мощность потребления в системе Iridium (1,4 кВт). Поэтому, предпочтителен вариант, аналогичный варианту радиовысотомера, где можно обеспечить режим синхронизации по несущей частоте и фазам элементов патч, для 3-х полотен КА в режиме приёма. Тогда мы можем поднять коэффициент усиления общей приёмной антенны состоящей из 3-х полотен в 2,732 раза (поток будет 2,146 Гбит/сек) с учётом того, что два соседних крайних полотна имеют отклонение от среднего полотна $\pm 30^\circ$ с сокращением при этом их площади от нормали среднего полотна в 0,866 раз. В этом случае повышение мощности при передаче будет 16,9 Вт. При использовании 23,02 лучей общая мощность в импульсе составит 389 Вт, а при скважности 1,17 и к.п.д. для одночастотного режима мы будем иметь энергопотребление 682 Вт. Общее потребление на режим работы с абонентами и межспутниковую связь составит 1,732 кВт. Это означает, что выбранное расположение антенн позволяет снизить энергопотребление в 2 раза в режиме Internet по сравнению с OneWeb и обеспечить при этом межспутниковую связь. Однако это больше потребления в системе Iridium (1,4 кВт), поэтому при этом желательно использовать дополнительные солнечные батареи, которые мы предполагаем располагать на обратной стороне 14 АФАР. Понятно, что если использовать межспутниковую связь на 2 Гбит/сек в делении на приём и передачу по 1 Гбит/сек, то энергопотребление сократится до 1,391 кВт, что сравнимо с энергопотреблением Iridium.

Для приёма на КА используется абонентский терминал с коэффициентом усиления $G_{\text{прмаб1}}=400,8$

(26 дБ). Чтобы получить необходимый энергетический потенциал на частоте 2,7 ГГц нам потребуется 101 патч с общей импульсной мощностью 54 Вт, что при скважности $Q_{пр}=6,84$ энергопотребление в одночастотном режиме с к.п.д в одночастотном режиме составит 16 Вт. Понятно, что наши расчёты в предлагаемой конструкции для режима OneWeb по энергопотреблению проведены исходя из максимальной дальности в 2500 км. Однако реальная дальность изменяется от 650 км до 2500 км в зависимости от местоположения абонента, а это при регулировке мощности в зависимости от дальности позволит снизить энергопотребление. Ещё одно преимущество предлагаемой конструкции заключается в возможности (при необходимости) увеличить поток информации на одного абонента в 4 раза с использованием излучения от четырёх антенн по 24 дБ с разнесением несущих частот в полосе 304 МГц, но с уменьшением в 4 раза количества обслуживаемых абонентов с 60-ти до 15 абонентов. В этом случае на одного абонента из 15-ти будет приходиться поток 456 Мбит/сек при приёме абонентом 4-х несущих частот, и эта величина больше, чем поток информации для связи в TerraSAR-X в 300 Мбит/сек в 1,52 раза. Соответственно вместо 600 КА с выводом их на

орбиту 1200 км нам потребуется всего 98 КА с выводом на орбиту в 650 км. Отсюда экономическая эффективность предлагаемого метода по сравнению с системой OneWeb по критерию вес, количество КА и затраты на вывод на нужную высоту полёта будет выше $600 \text{ КА} \times 147,7 \text{ кг} \times 1200 \text{ км} / [(98 \text{ КА} \times 689 \text{ кг} \times 650 \text{ км})] = 2,42 \text{ раза}$. Система Starlink будет иметь 12000 КА, с весом 227 кг и высотой полёта 550 км. В этом случае экономическая эффективность от предлагаемого конструктивного решения по сравнению с системой Starlink, по тем же параметрам, будет лучше в 34 раза

Соответственно, теперь надо определить такое положение 15 полотен АФАР в раскладывающемся виде, при котором мы имели бы зону обслуживания по азимуту 360 градусов, а по углу места $\pm 75^\circ$ относительно нормали от основной панели расположенной горизонтально к Земле с минимальными отклонениями лучей от нормали к каждому полотну. Понятно, что для обеспечения по углу места $\pm 75^\circ$ с угловым изменением луча в каждом полотне $\pm 15^\circ$, оптимальным будет угловое расположение полотен по рисунку 14 ($30^\circ \times 5 \text{ полотен} = 150^\circ$).

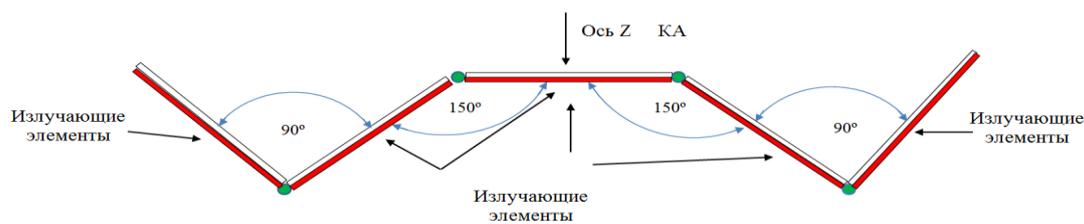


Рис.14. Сечение для показа углов места для антенн по середине, «гармошка» ленты Б.

● — обозначает механическую петлю (шарнир, элемент крепления, поворота и фиксации каждого полотна АФАР)

Предположить другой раскрыв, при обозначенном оптимальном количестве лучей АФАР с использованием в ленте 5 полотен (панелей) не представляется возможным. Чтобы обеспечить отсутствие затенения со стороны

полотен ленты А и С, для реализации режима работы по принципу Iridium, их необходимо расположить вверх по углу места относительно нижнего полотна на 60 градусов, как это показано на рисунке 15.

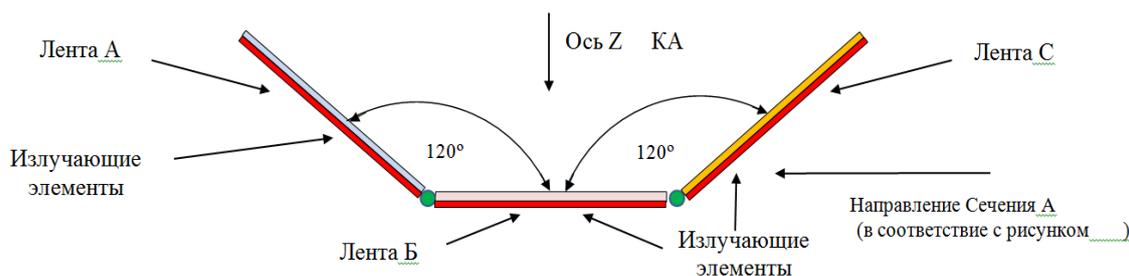


Рисунок 15. Сечение для показа углов места по боковым антеннам (лента А и С)

В итоге для реализации работы в режиме межспутниковой связи мы имеем расположение Iridium с использованием 12 секционных АФАР для полотен антенн по рисунку 16.



Рисунок 16. Оптимальный вариант расположения антенн.

Таким образом, мы показали преимущество предлагаемой конструкции при использовании её для межспутниковой связи, связи в режиме Iridium, связи Internet, в качестве радиовысотомера и локатора бокового обзора. Однако, это не все преимущества, что даёт предлагаемая система, в [17,18] показано как в предлагаемой конструкции за счёт новой обработки сигнала можно обеспечить метод навигации для каждого абонента с использованием одного КА и с увеличением количества пользователей на один КА в телефонном режиме до 6000 (4,6 кбит/сек на пользователя) -12000 (2,3 кбит/сек на пользователя) абонентов (Iridium имеет 1100 пользователей на один КА). Кроме того показан вариант

использования режима локатора бокового обзора без разнесения приёма и передачи даже в конструкции «гармошки» с учётом синфазности от разных полотен АФАР. Далее, по стоимости группировка в 98 спутников связи дешевле, чем группировка в 24 спутника системы ГЛОНАСС, так как вес одного спутника системы ГЛОНАСС – К составляет 935 кг (вес GPS-ИФ 2170 кг, но с радиационной защитой). У предлагаемого варианта вес одного спутника в самом худшем случае, если ориентироваться на вес спутника Iridium не более 689 кг (вес спутника Globalstar – 550 кг). При этом для запуска спутника ГЛОНАСС требуется потратить топлива больше как минимум в 19000 км/650 км =29,2 раза. Отсюда по стоимости новая

группировка ГЛОНАСС в 24 спутника будет превосходить стоимость от предлагаемой группировки в 98 КА как минимум в $(24 \text{ (КА)} \times 935 \text{ кг} \times 29,2) / (98 \text{ (КА)} \times 689 \text{ кг}) = 9,7$ раз. При этом, система ГЛОНАСС не имеет возможности к самокупаемости, так как производство навигаторов захватили зарубежные фирмы и абоненты получают информацию по навигации бесплатно. С весом спутника Globalstar - 550 кг при высоте 1400 км при использовании 48 КА с обслуживанием одновременно 2500 пользователей, мы имеем экономическую эффективность предлагаемой конструкции

$$\frac{48 \text{КА} \times 550 \text{кг} \times 1400 \text{км} \times 6000 \text{пользователей}}{(98 \text{КА} \times 689 \text{кг} \times 650 \text{км} \times 2500 \text{пользователей})} = 2,02 \text{ раза}$$

Экономическая эффективность от предлагаемой конструкции по сравнению с Iridium по тем же параметрам составит 4,4 раза. При сравнении локатора бокового обзора TerraSAR-X с вариантом конструкции предлагаемого устройства необходимо учесть, что КА TerraSAR-X весит 1209 кг, при высоте полёта 514,8 км и максимальной дальности зоны обслуживания 916 км. Предлагаемый вариант имеет вес 689 кг, высоту полёта 650 км и максимальная дальность зоны обслуживания может достигать до 1628 км-2500 км. Отсюда мы имеем экономическую эффективность предлагаемого варианта в $1209 \text{кг} \times 514,8 \text{км} \times 1628 \text{км} / [(689 \text{кг} \times 650 \text{км} \times 916 \text{км})] = 2,47$ раз. Кроме того, так как у нас 98 КА, то это позволяет делать повторный обзор участка не через 2,5 суток, а через каждые $2,5 \times 24 \text{ часа} \times 60 \text{ минут} \times 916 \text{ км} / [(98 \text{ КА} \times 689 \text{ кг} \times 1628 \text{ км})] = 21 \text{ минуту}$, для чего соответствующий КА может заранее переводиться в состояние плоского общего полотна на время обзора (при увеличении времени обзора одного участка с кратковременным повышением

мощности разложение в плоский вид может не потребоваться). Это важно для контроля территории в глубине страны противника. Кроме того, при разнесении приёма и передачи в режиме зондирования Земли мы будем иметь картину в реальном масштабе времени при обеспечении скрытности точек приёма информации, а это для разведки в прифронтовой зоне имеет первостепенное значение. Следовательно, мало того, что предлагаемая конструкция даёт унификацию КА различного назначения, она имеет экономическое и техническое преимущество по сравнению с такими системами как Iridium, Globalstar, OneWeb, Starlink, ГЛОНАСС, TerraSAR-X, Seasat-A.

При этом определение местоположения может быть с разрешением менее одного метра, и связь между КА и абонентом с анализом радиолокационной обстановки в месте пролёта позволяет формировать кодирование с работой КА в диапазоне предлагаемых несущих частот на уровне шумов и отстройкой для исключения помех другим радиоэлектронным средствам. Это снимает требование по разрешению от государственного комитета по радиочастотам (ГКРЧ), если ещё учесть, что 4 августа 2021 года Госкомиссия по радиочастотам (ГКРЧ) продлила на 10 лет МТС, «МегаФон», «Билайн» и Tele2 разрешение на использование частот 700 МГц, 800 МГц и 2,5–2,7 ГГц для сотовых сетей четвертого поколения (LTE), которое истекло 8 сентября 2021 года [19], но при условии, что операторы связи будут строить новые базовые станции только на базе оборудования, включенного в реестр российской электронной продукции, причём там должно быть установлено ПО из реестра российского программного обеспечения. Данные по частотам приведены ниже в таблице 3.

Таблица 3.

Оператор	Режим	Диапазон (band)	Частоты, МГц
Скартел	FDD	7	2500—2530 / 2620—2650
МегаФон	FDD	20	847—854,5 / 806—813,5
	FDD	7	2530—2540 / 2650—2660
ВымпелКом	TDD	38	2570—2595
	FDD	20	854,5-862 / 813,5-821
МТС	FDD	7	2550—2560 / 2670—2680
	FDD	20	839,5-847 / 798,5—806
	TDD	38	2595—2620
Ростелеком	FDD	20	832—839,5 / 791—798,5
	FDD	7	2560—2570 / 2680—2690
Основа Телеком	TDD	40	2300—2400

Понятно, что у указанных фирм нет ни одной своей разработки по обработке радиосигнала, унификации, а также нет новых предложений по конструкции. Кроме того, невозможно поставить вышки в океане, а также они не нужны в тайге и пустыне. Уязвимость вышек обнаружилась

и при ведении боевых действий. Предлагаемая конструкция может быть сопряжена в городах по диапазону с устройствами указанных фирм и нам нет необходимости работать там, где уже есть покрытие от устройств указанных фирм. Использование нами диапазона от 2,4 ГГц – 2,7 ГГц

позволит расширить возможности по приёму потока информации даже для мобильных устройств Globalstar, так как приём сигналов от мобильных устройств на КА предполагаемой конструкции возможен и в L-диапазоне 1,6 ГГц, что достигается соответствующим подбором фаз для каждого элемента патч. Дополнительно, есть возможность использования данной конструкции расположения антенн для постановки направленных помех системе GPS в режиме ретрансляции сигналов со спутников GPS, закрывая тем самым нужную область, что не даст беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) ориентирования на местности.

Таким образом, предлагаемая конструкция имеет следующие преимущества:

Гибкое разложение панелей 15 полотен АФАР (рисунок 9) по рисункам 12,14-16 с разбиением каждого полотна АФАР на 4 подАФАР по рисунку 11, с параметрами антенны как у антенны Iridium, позволяет использовать КА НССС в многофункциональном режиме с унификацией узлов в различных режимах связи, навигации, радиовысотомера, межспутниковой связи, а также в качестве локатора бокового обзора с улучшением характеристик по сравнению с зарубежными аналогами.

За счёт разложения полотен антенн появилась возможность использования стороны обращённой к солнцу в качестве солнечной панели, что также улучшает энергетические характеристики КА.

При варианте многофункционального использования КА НССС появилась возможность сократить количество КА в группировке до оптимума с уменьшением засорённости космоса.

Совмещение режимов навигации и связи позволяет обеспечить скрытность работы устройства на уровне шумов с отсутствием помех другим устройствам, работающим в этом диапазоне.

Появилась возможность оплачивать услуги навигации непосредственно по запросу о местоположении.

Таким образом, существующие варианты КА, для обеспечения Internet, пошли по пути увеличения значения несущих частот с расширением полосы пропускания для многочастотного режима (для OneWeb это полоса в 225 МГц) с увеличением энергетического потенциала за счёт коэффициента усиления антенн абонентов при приемлемых размерах, а также было увеличено количество КА в группировке. При этом вариант многофункционального использования вообще не рассматривался. В предлагаемой конструкции несущая частота выбиралась исходя из полосы пропускания для Internet и использования в многофункциональном режиме для целей навигации, локатора бокового обзора и радиовысотомера. Здесь, чтобы сохранить количество КА близкое к количеству КА в Iridium с обслуживанием аналогичных подспутниковых пятен и наличием полосы пропускания в 300 МГц потребовалось отказаться от многочастотного и многолучевого варианта за счёт диаграммо-

образующих схем Батлера и Бласса, что повышало потери в 1,6 раза. При этом, чтобы обеспечить многолучевой вариант, с наличием аналогичных характеристик по обслуживанию абонентов и наличием приемлемых размеров антенн под обтекателем ракеты, была выбрана раскладывающаяся конструкция антенн в космосе. В этом случае мы имеем возрастание количества антенн в 2,5 раза с 6-ти до 15, но при этом используется гибкий подход установки луча в направлении на абонента за счёт последовательного обслуживания во времени абонентов с переходом на более высокую несущую частоту, что повышает коэффициент усиления антенны и позволяет заменить многочастотный режим на одночастотный с улучшением к.п.д в 1,625 раз. Действительно, нет необходимости иметь луч в том направлении, где в данный момент времени не осуществляется приём и передача. Так как таких последовательных во времени слотов в Iridium от четырёх до восьми, то в 15 направлениях при 15 полотнах АФАР нам необходимо направить луч в соответствующие 4-8 направлений с разнесением во времени. Это будет эквивалентно 60-120 лучам одновременно. Напомним, что в Iridium диаграммо-образующая схема формирует одновременно 8 лучей, но необходимость восьми слотов, дающих последовательный приём и передачу во времени приводит к бесполезности применения многолучевой схемы Батлера. Так 8 последовательных слотов с учётом перехода на несущую частоту в 2 раза выше приведёт к увеличению коэффициента усиления антенны в 4 раза при той же площади антенны, и это позволит уже использовать не 8 последовательных слотов, а 32. При этом, так как в Iridium в одной АФАР из шести при 8 лучах разделённых по частоте требуется 64 Вт по 8 Вт в импульсе на один луч, то мы можем поднять мощность излучения в одной луче предлагаемой конструкции также в 8 раз, и увеличить при этом количество последовательных слотов также в 8 раз до 256. В этом случае на одного абонента будет приходится 130 мксек. Соответственно при наличии 15 полотен АФАР мы будем обслуживать 3840 абонентов. Если исходить из 4 последовательных слотов вместо 8-ми, то всё равно мы будем иметь обслуживание 1920 абонентов вместо 1100 как в Iridium. Кроме того, обслуживание абонентов при передаче сигналов от КА будет идти в одночастотном режиме без потерь на диаграммо – образующую схему Батлера, и общий выигрыш в $1,6 \times 1,625 = 2,6$ раз позволяет компенсировать проигрыш в 2,5 раза от увеличения количества антенн. Понятно, что дальнейшее увеличение количества полотен антенн больше 15 уже не будет оптимальным с точки зрения энергопотребления и веса, а меньшее количество ухудшает характеристики по чувствительности из-за уменьшения используемой площади антенн в дальней зоне обзора с уменьшением количества обслуживаемых абонентов и не позволяет достичь характеристик для многофункционального применения. Кроме того, деление полотна на 4

подАФАР позволяет обеспечить увеличение потока информации с объектами на Земле (шлюзовые станции), когда нет требований к энергопотенциалу. При этом мы ещё конечно не учитывали преимущество от использования направленной антенны абонента в 5 дБ (Зраза). Отметим, что при приёме сигналов на КА от абонентов, можно использовать 8 ФАПЧ параллельно по 8 каналам, без увеличения мощности для передатчиков абонентов в 8 раз за счёт увеличения времени приёма. При этом время на один последовательный слот при передаче сигнала от абонента на КА будет равен 1 мсек. Это позволяет уменьшить среднюю мощность передатчика абонента в 8 раз до 80 мВт. Надо отметить, что последовательный режим обслуживания по угловым направлениям не сказывается на режиме первоначального «дозвона», так как перед звонком устройство абонента входит в режим ожидания первоначального запросного сигнала от КА, который повторяется каждые 1-5 секунд (время вхождения в связь для Globalstar 10 секунд), и здесь может использоваться луч сразу по 60-ти направлениям с меньшим коэффициентом усиления, но, с временем излучения на одной частоте в 4 раза больше с кодовой определённой последовательностью. После получения этого сигнала даётся ответный кодовый сигнал в течение 8 – 9 мсек (это время прохождения 2500 км). Надо отметить, что у нас на одном полотне находится 20 быстродействующих программно-логических интегральных схем (ПЛИС), которые способны выделять по два кодовых сигнала одновременно и это означает, что мы можем принимать в один момент времени до 40 звонков. При 15 АФАР в КА количество одновременно принимаемых звонков возрастает до 600. Это практически половина всех абонентов обслуживаемых в Iridium в разговорном режиме. Таким образом, мы видим преимущество раскладывающейся предлагаемой конструкции по сравнению с конструкцией системы Iridium с получением улучшенных радиотехнических параметров. Раскладывающаяся конструкция позволяет также достичь коэффициента усиления общей антенны КА сопоставимого с коэффициентами усиления локатора бокового обзора и радиовысотомера. Одновременно, раскладывающаяся конструкция позволила поднять коэффициент усиления антенны КА для связи в Internet в направлении на абонента, и тем самым уменьшить коэффициент усиления направленной антенны абонента с наличием приемлемых размеров (аналогичных антеннам абонентов OneWeb и Starlink). При этом понижение несущей частоты для антенн предлагаемой конструкции по сравнению с несущей частотой для Internet в системах OneWeb и Starlink даёт преимущество в повышении чувствительности за счёт площади антенн КА при том же коэффициенте усиления. Соответственно уменьшается поглощение радиоволн в среде. Кроме того, широкий диапазон частот позволяет исключить

мешающее воздействие на другие радиоэлектронные средства, работающие в данном диапазоне частот. Также появляется возможность отстройки от помех по боковым лепесткам.

Следовательно, проведённый анализ показывает, что предлагаемая конструкция превосходит все существующие аналоги и обеспечивает многофункциональный режим.

Литература:

- <https://ru.wikipedia.org/wiki/Globalstar>
<https://ru.wikipedia.org/wiki/OneWeb>
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Starlink>
[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%80%D0%B8%D0%B4%D0%B8%D1%83%D0%BC_\(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D1%80%D0%B8%D0%B4%D0%B8%D1%83%D0%BC_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82))
 Мамонкин И.Г. Усилительные устройства. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. М., «Связь», 1977, стр. 235.
 Бартон, Г. Вард. Справочник по радиолокационным измерениям. -М.: Сов. радио. 1976, стр. 316.
<http://terraview.ru/articles/11/terra-sar-x>
 Дубровка Ф.Ф., Мартынюк С.Е. Полосковая антенная решётка с воздушным заполнением. Вісник Національного технічного університету України «КПІ» Серія-Радіотехніка. Радіоапаратуобудування. 2009, №38.
[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%B0_\(%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%B0_(%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0))
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%82%D1%87-%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0>
 В.И. Тихонов. Статистическая радиотехника. – М.: Сов. радио. 1966, стр. 473.
<https://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf?ysclid=lbnd4jjjq8295855268>
<https://present5.com/precizionnaya-radiovysotometriya-iz-kosmosa-zadachi-reshaemye-precizionnym-radiovysotomerom/?ysclid=I7y334fiot328583083>
<https://mai.ru/upload/iblock/eef/solnechnye-i-akkumulyatornye-batarei-oao-saturn-na-kosmicheskikh-apparatakh-s-elektronnyimi-dvigatelyami.pdf?ysclid=lbep4x2a16589001425>
 Нгуен Ван Куан, М.А. Маркелова, В.И. Веремьев. Анализ возможности использования спутниковых сигналов подсвета для пассивной радиолокационной системы. Науч. журнал. «Вестник новгородского государственного университета» №4(116), (2019), стр. 86-91.
<https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-vozmozhnosti-ispolzovaniya-sputnikovyh-signalov-podsveta-dlya-passivnoy-radiolokatsionnoy-sistemy/viewer>
<http://lib.tssonline.ru/articles2/sputnik/analiz-mnogoluchevoy-rabochey-zony-sputnikov-oneweb>

Рысин.А.В.,Бойкачёв, В.Н.,Наянов А.М. Способ быстрой фазовой автоподстройки частоты для оптимальной когерентной обработки радиосигналов в низкоорбитальных спутниковых системах связи (НСС). Науч.журнал. «Sciences of Europe»(Praha,Czech Republic)/2021-.№80(2021) vol.1,р.52-70.

Рысин.А.В., Бойкачёв В.Н., Наянов А.М. «Евразийский союз учёных.» Серия: Технические и физико-математические науки. Том.1, №07 (100) (2022), стр.22.

https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2021/07/09/877491-sotovih-operatorov-obyazhut-postroit-4g-v-selah?utm_campaign=newspaper_9_7_2021&utm_medium=email&utm_source=vedomosti.

Евразийский Союз Ученых.

Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал

№ 3 (106)/2023 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Штерензон Вера Анатольевна

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

Синьковский Антон Владимирович

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

Штерензон Владимир Александрович

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

Зыков Сергей Арленович

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

Дронсейко Виталий Витальевич

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.