

УДК 621.385

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МОДИФИКАЦИИ ГИРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРИБОРОВ

А.А. КУРАЕВ, В.В. МАТВЕЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28 сентября 2017

Аннотация. Рассмотрены перспективные модификации гирорезонансных приборов – импульсная гиро-ЛБВ, гиро-ЛБВ в режиме сверхизлучения, каскадная гиро-ЛБВ на гофрированном волноводе, широкополосный гироусилитель на коническом волноводе, высокоорбитный гиротрон на пениотронном резонаторе, гироклистрон на конических коаксиальных резонаторах, гироклистрон на резонаторах Фабри-Перо, низковольтные гироклистрон и гиротрон с неоднородным магнитным полем.

Ключевые слова: гиротрон, гиро-ЛБВ, гироклистрон, конические волноводы и резонаторы, гофрированные волноводы, сверхизлучение.

Abstract. The perspective gyro-resonance modifications were considered – pulsed gyro-TWT, gyro-TWT at electromagnetic super radiating mode, cascaded gyro-TWT with a corrugated waveguide, broadband gyro-amplifier with a conical waveguide, high-orbit gyrotron with a peniotron cavity, gyrokystron with conical coaxial cavities, gyrokystron with Fabry-Perot cavities, low-voltage gyrokystron and gyrotron with an inhomogeneous magnetic field.

Keywords: gyrotron, gyro-TWT, gyrokystron, conical waveguides and cavities, corrugated waveguides, superradiation.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 110, No. 8, pp. 26-32
Perspective gyro-resonance modifications
A.A. Kurayev, V.V. Matveyenko

Введение

Широкий класс приборов, называемых гирорезонансными, включает гиротроны, гиро-ЛБВ, гироклистроны [1–4]. Объединяет эти приборы условие гирорезонанса, лежащее в основе их механизма работы [3]:

$$\omega \left(1 \mp \frac{v_{\parallel}}{v_{\perp}} \right) = k\Omega, \quad (1)$$

где $\Omega = eB_0/m$ – циклотронная частота вращения электрона в магнитном поле B_0 , e – заряд электрона, $m = m_0/\sqrt{1-\beta^2}$ – масса движущегося электрона, m_0 – его масса покоя,

$\beta = v/c$, v – полная скорость электрона, c – скорость света в пустоте; $k = 1, 2, 3$ – номер рабочей гармоники циклотронной частоты; $\omega = 2\pi f$ (f – частота электромагнитного поля); v_{\parallel} – продольная (по оси волновода или резонатора) скорость электрона; v_{ϕ} – фазовая скорость

волны в волноводе или парциальной волны в резонаторе: $v_{\phi} = c \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f} \right)^2}$, где $f_{кр}$ –

критическая частота рабочей волны в волноводе; знак « \leftarrow » относится к попутной (по отношению к v_{\parallel}) волне, « \rightarrow » к встречной.

Фазировка ускоренных и замедленных в электромагнитном поле волны электронов

осуществляется за счет релятивистского изменения $\Omega(\beta)$: замедленные электроны имеют большую Ω , чем ускоренные, и догоняют их по фазе. Таким образом, образуется электронный фазовый пакет, возбуждающий электромагнитное поле в волноводе [3, 4].

Традиционная конструкция гирорезонансного прибора имеет в качестве электродинамической системы слабонерегулярный волновод круглого сечения; индукция магнитного поля $B_0 = \text{const}$ в области взаимодействия [1–4]. Такая конструкция определяет ряд ограничений: спирализованный трубчатый электронный поток должен быть «тонким» по радиусам ведущего центра вращения электронов, что ограничивает ток пучка; постоянство вдоль оси магнитного поля B_0 не позволяет управлять фазировкой электронов, что возможно только при значительном отклонении B_0 от синхронного значения [5].

В настоящей статье рассмотрен ряд нетрадиционных модификаций гирорезонансных приборов, существенно расширяющих их возможности.

Импульсная гиро-ЛБВ

Импульсный генератор-гиротрон с двухзеркальным резонатором на бетатроне описан в [6]. Импульсный усилитель на гиро-ЛБВ может быть создан при условии: $\beta_\phi = 1/\beta_\parallel$, $v_\phi = \beta_\phi/c$, $v_\parallel = \beta_\parallel/c$.

В этом случае короткий по длине электронный спирализованный луч, сопровождаемый усиливающимся электромагнитным пакетом, длительное время движется в волноводе. Условием такого сопровождения является равенство продольной скорости электронов и групповой скорости электромагнитного пакета, т. е. $\beta_\parallel = \beta_{гр} = 1/\beta_\phi$, $v_{гр} = \beta_{гр}/c$, $v_{гр}$ – групповая скорость. Такое условие иллюстрирует рис. 1.

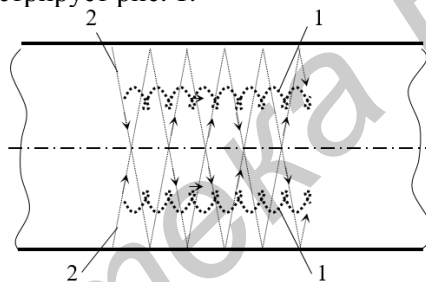


Рис. 1. Сечение двухзеркального резонатора:

1 – сопровождающая бегущая электромагнитная волна; 2 – электронный спирализованный луч

Сверхизлучение в гиро-ЛОВ

Генерация наносекундных импульсов в режиме пространственного накопления энергии при черенковском сверхизлучении достаточно изучена и экспериментально реализована с использованием неоднородных замедляющих систем [7]. Экспериментально достигнуто четырехкратное превышение мощности электромагнитного импульса над мощностью релятивистского пучка в лампе обратной волны ЛОВ [8].

Реализация механизма сверхизлучения в гиро-ЛОВ может быть осуществлена более простым методом, чем в черенковской ЛОВ – за счет использования неоднородного магнитного поля $B_0(z)$. На рис. 2 показано необходимое распределение этого поля в области взаимодействия гиро-ЛОВ.

На протяженном начальном участке, $z = 0 \dots z_0$, это поле имеет значение B_0 , меньшее синхронного значения. Здесь невозможно самовозбуждение системы поток-волновод (оно начинается с малых амплитуд, и требуется поле B_0 , близкое к синхронному). На конечном участке B_0 возрастает до B_n – синхронного (обеспечивающего пусковые условия для генерации обратной волны) значения. Таким образом, механизм сверхизлучения при описанном распределении $B_0(z)$ реализуется так: при достижении участка z_1, z_0 передним фронтом импульса тока происходит генерация и начальное усиление короткого импульса обратной волны (он указан на рис. 2). Этот импульс распространяется навстречу протяженному электронному импульсу на участке $z_1 \dots 0$. Благодаря достижению конечной амплитуды электромагнитный импульс отбирает энергию при $B_0(z) = B_0$ от группирующегося электронного пучка при обычном для гиро-ЛОВ КПД по мощности 20...30%. При значительном превышении длительности электронного

импульса τ_e над длительностью электромагнитного импульса τ_s , возможно существенное превышение мощности электромагнитного импульса над мощностью электронного потока.

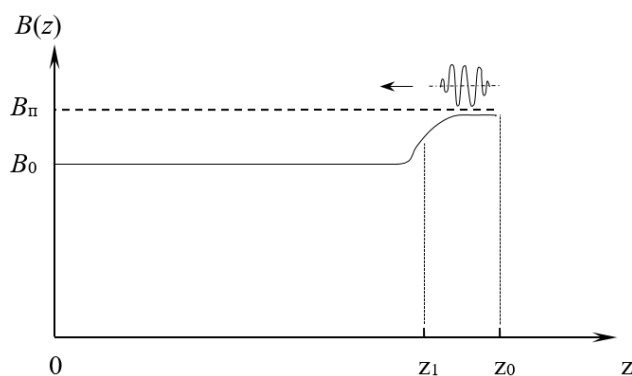


Рис. 2. Распределение неоднородного магнитного поля $B_0(z)$ в области взаимодействия giro-ЛЮВ

Каскадная giro-ЛБВ на гофрированном волноводе

В работе [9] показано, что использование замедляющей системы типа гофрированного волновода на волне E_{0i} в giro-ЛБВ позволяет понизить требуемую для заданной рабочей частоты f индукцию магнитного поля B_0 почти вдвое при сохранении типичного для giro-ЛБВ значения КПД порядка 30 %. Эта возможность весьма привлекательна для коротковолновых giro-ЛБВ, когда реализация требуемых значений B_0 проблематична. Такие же результаты можно ожидать и для волн типа H_{n1} (волны H_{01} не замедляются в гофрированном волноводе). Повышение КПД может быть достигнуто в каскадной схеме giro-ЛБВ, изображенной на рис. 3.

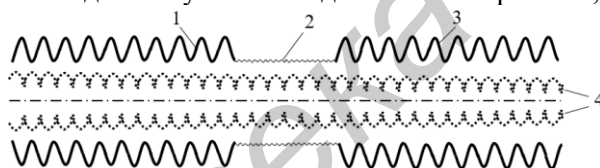


Рис. 3. Каскадная замедляющая система гофрированного волновода на волне E_{0i} :
1, 3 – гофр первого и второго каскада волновода; 2 – неотражающая шероховатая или поглощающая металлическая поверхность; 4 – электронный спирализованный луч

Широкополосный giroусилитель на коническом волноводе

В соответствии с условием (1) гирорезонансные усилители принципиально являются узкополосными. Их полоса усиления (и перестройка генерации) ограничивается полосой циклотронного резонанса. Однако giroусилитель можно сделать широкополосным, если использовать конический волновод и неоднородное по оси магнитное поле. На рис. 4 изображены схема giroусилителя отражательного типа, в которой реализуется такой путь, и магнитное распределение магнитного поля. В соответствии с рис. 4 (часть а), входной сигнал 1 входит в волновод 3, имеющий коническую секцию 4. В этой секции располагаются критические сечения данного типа волны для частот $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ ($\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 \dots$). В этих сечениях имеет место поперечный резонанс рабочего типа волны на перечисленных частотах. Электрическое поле волны H -типа здесь резко возрастает. Образуется квазирезонансная область.

Магнитное распределение магнитного поля $B(z)$ (рис. 4, часть б) выбрано таким образом, что в соответствующих сечениях $\Omega_1 = eB_1/m = \omega_1, \Omega_2 = eB_2/m = \omega_2, \Omega_3 = eB_3/m = \omega_3, \dots$, т. е. в точках резонанса выполняются условия циклотронного резонанса. Эти условия выполняются на любой частоте в диапазоне $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$. Этот диапазон может быть достаточно широким. Выходной сигнал 2, отраженный на критических сечениях, направляется обратно. Таким образом, получается схема отражательного усилителя, требующего на входе слева Y-циркулятор, разделяющий входной и выходной сигналы.

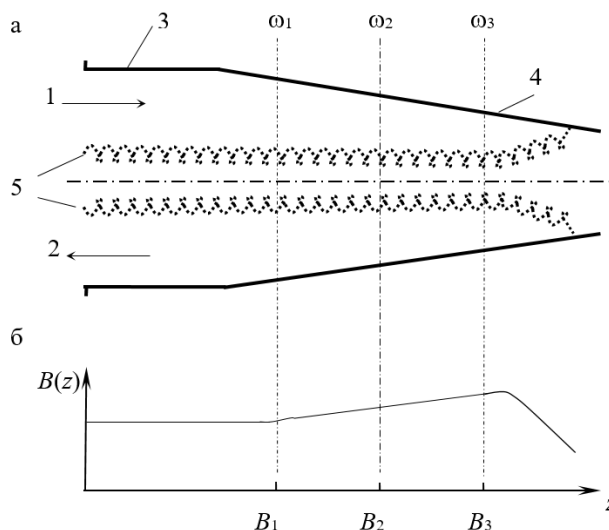


Рис. 4. Схема гироусилителя отражательного типа (часть а) и магнитное распределение магнитного поля (часть б):
1, 2 – входной и выходной сигнал; 3 – волновод; 4 – коническая секция волновода;
5 – электронный спирализованный луч

Высокоорбитный гиротрон на пениотронном резонаторе

Продвижение гиротронов в коротковолновый диапазон 220 ГГц может быть обеспечено работой на высоких гармониках циклотронной частоты Ω : $k\Omega \approx \omega$, $k = 3 \dots 10$, поскольку для $k = 1$ необходимое значение B_0 создать невозможно (можно только в импульсе, но импульсные магниты нестабильные, быстро разрушаются). Однако для достижения эффективного взаимодействия в гиротроне при $k > 2$ необходимо создать интенсивную пространственную гармонику электромагнитного поля на орбите электрона [3]. На рис. 5 приведено поперечное сечение высокоорбитного гиротрона на пениотронном резонаторе [3], в котором при $k = 4$ указанное условие выполняется. В отличие от пениотрона в гиротроне происходит орбитальная группировка электронов, а не силовая, поэтому следует ожидать, что необходимая нагруженная добротность резонатора для гиротрона окажется значительно ниже, чем для пениотрона. Последнее и обеспечит возможность реализации гиротрона в 220 ГГц диапазоне – в отличие от пениотрона.

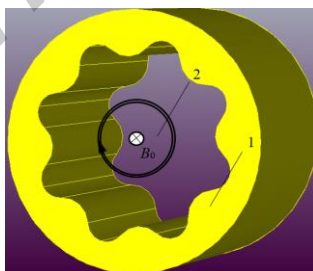


Рис. 5. Поперечное сечение высокоорбитного гиротрона на пениотронном резонаторе:
1 – пениотронный блок резонатора; 2 – осесимметричный моновинтовой электронный поток

Гироклистрон на конических коаксиальных резонаторах

В работах [3, 10] рассчитаны гиротроны коротковолнового диапазона на конических коаксиальных резонаторах. Подтверждена их перспективность в двух отношениях: возможно использование широких спирализованных потоков при минимальном динамическом расслоении; собственная добротность двухзеркального конического резонатора значительно выше, чем в традиционных волноводных резонаторах гиротронов. То и другое весьма существенно для продвижения мощных гиротронов в коротковолновой диапазон.

На рис. 6 приведено сечение гироклистрона на конических коаксиальных резонаторах – дальнейшее развитие идей работ [3, 10]. На рис. 7 изображен аналогичный предыдущему клино-гироклистрон на наклоненных относительно оси широкого спирализованного электронного потока резонаторах – развитие идеи работы [11].

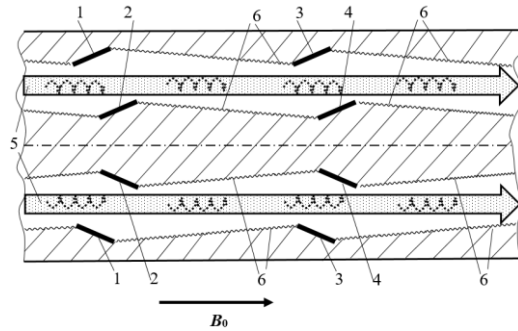


Рис. 6. Сечение гироклистрона на конических коаксиальных резонаторах: 1, 2 – внешние и внутренние зеркала входного коаксиального конического резонатора; 3, 4 – то же для выходного резонатора гироклистрона; 5 – трубчатый спирализованный электронный поток; 6 – неотражающие шероховатые или поглощающие металлические поверхности

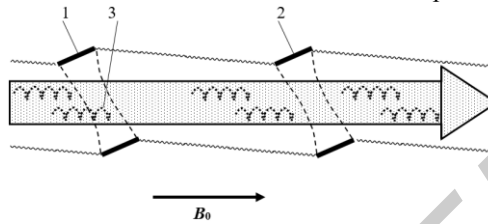


Рис. 7. Клино-гироклистрон на наклоненных относительно оси широкого спирализованного электронного потока резонаторах: 1 – входной резонатор Фабри-Перо; 2 – выходной резонатор; 3 – широкий электронный поток

Низковольтные гироклистрон и гиротрон с неоднородным магнитным полем

Как известно из теории гирорезонансных приборов, их механизм работы основан на релятивистском изменении циклотронной частоты $\Omega = eB_0/m$: ускоренные электроны увеличивают свою массу $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ и, соответственно, уменьшают свою Ω , замедленные – увеличивают. Благодаря этому замедленные в электромагнитной волне электроны «догоняют» по фазе вращения ускоренные. Таким образом формируется фазовый пакет (электронный сгусток), излучающий при своем циклотронном вращении электромагнитную энергию. Этот эффект становится существенным и реализуемым в электронных приборах с достаточно высокими напряжениями электронного пучка порядка 10 кВ ($\beta = v/c = 0,2$). При низких напряжениях, например, 200 В ($\beta = 0,03$), этот эффект ничтожен и не может быть использован для создания гирорезонансных приборов классического типа.

В работе [5] показано, что в неоднородном магнитном поле с колоколообразным распределением возникает новый, нерелятивистский механизм группировки электронных роторов: ускоренные электроны задерживаются на участке неоднородного B_0 большее время, чем замедленные, возникает продольная группировка электронных роторов. Эта группировка не зависит от релятивизма электронов (β). Такой тип группировки может быть использован в низковольтных гирорезонансных приборах, схемы которых приведены на рис. 8.

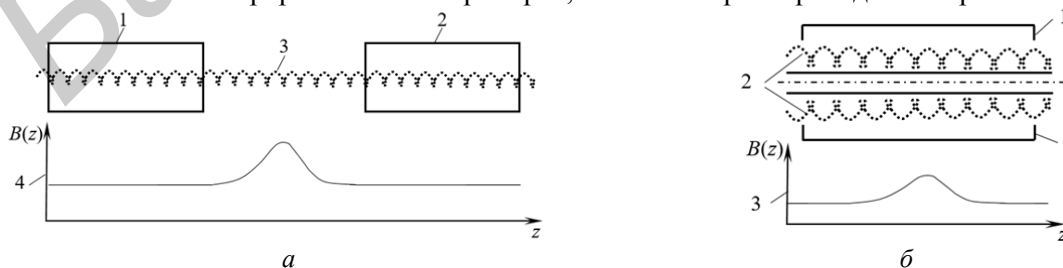


Рис. 8. Гироклистрон (а): 1 – входной резонатор; 2 – выходной резонатор; 3 – спирализованный выходной электронный поток; 4 – распределение магнитного поля $B(z)$; гиротрон (б): 1 – коаксиальный резонатор; 2 – трубчатый спирализованный электронный поток; 3 – распределение магнитного поля $B(z)$

Заключение

Представленные модификации гирорезонансных приборов весьма перспективны для исследования и разработки в определенных направлениях:

- для достижения больших и сверхбольших мощностей на основе использования широких электронных потоков;
- для генерации наносекундных сверхмощных импульсов;
- для продвижения в коротковолновую область частот – в востребованный в настоящее время диапазон 220 ГГц;
- для создания низковольтных гирорезонансных усилителей и генераторов.

Список литературы

1. The gyrotron / V.A. Flyagin [et al.] // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1977. Vol. 25, № 6. P. 514–521.
2. Hirshfield J.L., Granatstein V.L. The electron cyclotron maser – an historical survey // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1977. Vol. 25, № 6. P. 522–527.
3. Кураев А.А., Матвеев В.В., Сенько А.В. Гирорезонансные приборы. Гиротрон, гироклистрон, гиро-ЛБВ, пениотрон. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 137 с.
4. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров. М.: Радио и связь, 1986. 208 с.
5. Жураховский В.А., Кураев, А.А. О роли неоднородности направляющего магнитного поля на участках электронного дрейфа секционированных гирорезонансных приборов // Радиотехника. 1971. Вып. 18. С. 62–65.
6. Кураев А.А., Бабурич В.Б., Ильин Е.М. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ приборов. Минск: Наука и техника, 1990. 392 с.
7. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Сеницын А.К. Оптимизация условий усиления наносекундных импульсов в режиме пространственного накопления энергии при черенковском сверхизлучении // Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. Т. 13, № 11. С. 68–76.
8. Черенковское сверхизлучение с пиковой мощностью, превосходящей мощность электронного потока / А.А. Ельчанинов [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77, № 6. С. 314–318.
9. Гиротроны и гиро-ЛБВ на замедленной E_{0r} -моду гофрированного волновода / В.Ф. Кравченко [и др.] // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4, № 4 (17). С. 40–55.
10. Кураев А.А., Лукашенок Д.В., Сеницын А.К. Коаксиальный гироклиноотрон // Докл. БГУИР. 2011. № 1 (55). С. 85–90.
11. Кураев А.А. МЦР-монотрон с широким электронным потоком и наклонным относительно оси резонатора магнитным полем // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14, № 9. С. 1614–1622.

References

1. The gyrotron / V.A. Flyagin [et al.] // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1977. Vol. 25, № 6. P. 514–521.
2. Hirshfield J.L., Granatstein V.L. The electron cyclotron maser – an historical survey // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1977. Vol. 25, № 6. P. 522–527.
3. Kuraev A.A., Matveenko V.V., Sen'ko A.V. Girezonzansnye pribory. Girotron, giroklistron, giro-LBV, peniotron. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 137 с.
4. Kuraev A.A. Moshhnye pribory SVCh. Metody analiza i optimizacii parametrov. M.: Radio i svjaz', 1986. 208 s.
5. Zhurahovskij V.A., Kuraev, A.A. O roli neodnorodnosti napravljajushhego magnitnogo polja na uchastkah jelektronnogo drejfa sekcionirovannyh girezonzansnyh priborov // Radiotekhnika. 1971. Vyp. 18. S. 62–65.
6. Kuraev A.A., Baburin V.B., Il'in E.M. Matematicheskie modeli i metody optimal'nogo proektirovanija SVCh priborov. Minsk: Nauka i tehnika, 1990. 392 s.
7. Kravchenko V.F., Kuraev A.A., Sinicyn A.K. Optimizacija uslovij usilenija nanosekundnyh impul'sov v rezhime prostranstvennogo nakoplenija jenerгии pri cherenkovskom sverhizluchenii // Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy. 2008. T. 13, № 11. S. 68–76.
8. Cherenkovskoe sverhizluchenie s pikovoj moshhnost'ju, prevoshodjashhej moshhnost' jelektronnogo potoka / A.A. El'chaninov [i dr.] // Pis'ma v ZhJeTF. 2003. T. 77, № 6. S. 314–318.
9. Girotrony i giro-LBV na zamedlennoj E_{0r} -mode gofrirovannogo volnovoda / V.F. Kravchenko [i dr.] // Fizicheskie osnovy priborostroenija. 2015. T. 4, № 4 (17). S. 40–55.

10. Kuraev A.A., Lukashonok D.V., Sinicyn A.K. Koaksial'nyj giroklinotron // Dokl. BGUIR. 2011. № 1 (55). S. 85–90.
11. Kuraev A.A. MCR-monotron s shirokim jelektronnym potokom i naklonnym otnositel'no osi rezonatora magnitnym polem // Radiotekhnika i jelektronika. 1969. T. 14, № 9. S. 1614–1622.

Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвеев В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-84-98;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sci., professor, professor of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics

Matveenko V.V., PhD, associate professor, associate professor of computational methods and programming department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university of
informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-84-98;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Aleksandr Aleksandrovich