

УДК 621.391: 621.395

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.И. КИРИЛЛОВ, А.И. БЕЛКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220027, Беларусь*

*Могилевский филиал РУП «Белтелеком»
Ленинская, 12, Могилев, 212030, Беларусь*

Поступила в редакцию 21 января 2014

Кратко изложены основные результаты исследований по анализу и структурно-параметрическому синтезу цифровых систем абонентского доступа, полученные в БГУИР. Указаны основные направления исследований и приведены варианты структурно-параметрического синтеза цифровых систем, использующих различные технологии передачи и построения сетей связи. Проведен анализ полученных результатов, на основании которого разработаны рекомендации по практическому использованию. Сформулированы направления для перспективных исследований.

Ключевые слова: цифровая система передачи, абонентская сеть доступа, регенерационный участок, структурный синтез, параметрический синтез.

Введение

Стремительное развитие микроэлектронной промышленности в конце XX века обусловило революционный прорыв в области информационных технологий, который, в свою очередь, определил дальнейшее развитие телекоммуникационных систем и технологий цифровой передачи.

Несомненным лидером здесь стали цифровые волоконно-оптические системы передачи [9], сразу занявшие нишу магистрального участка сетей передачи (сеть распределения). При этом для распределительного (абонентского) участка сети предполагалось использование значительного более широкого спектра технологий передачи (волоконно-оптическая, радиодоступ, меднокабельная). Последняя среди них являлась наиболее предпочтительной для начала внедрения [9].

Начиная с 1990-х гг. приблизительно одновременно на рынке телекоммуникаций для симметричных медных линий появилось целое семейство технологий передачи, объединенных общим названием xDSL (digital subscriber line – цифровая абонентская линия), где аббревиатура «x» указывала на конкретный подвид семейства, отличающийся способом передачи (симметричный/асимметричный), видом линейного сигнала, скоростью и т.п.

Следует отметить, что несмотря на стандартизацию данных технологий (см., например, ITU-T Recommendations G.992.1, G.992.3, G.992.5, G.991.1, G.991.2) и присутствие достаточного количества работ по особенностям их построения и работы (см., например, Thomas Starr, Massimo Sorbara, John M. Cioffi, Peter J. Silverman. DSL Advances. Prentice Hall, 2003), не раскрытым являлся вопрос об их практическом использовании применительно к параметрам существующих кабельных линий с учетом их разнотипности, состояния, для различных режимов работы оборудования и вариантов построения сети.

В связи с этим в качестве направлений для исследований авторами были определены: разработка обобщенных методов оценки эффективности цифровых систем передачи (ЦСП)

абонентского доступа по технологиям xDSL, исследование их эффективности с учетом реальных условий эксплуатации, в зависимости от типов и параметров кабельных линий и вариантов построения сетей, разработка и анализ эффективности вариантов их оптимизации с использованием методов структурно-параметрического синтеза. При этом рассматривались ЦСП с различными технологиями передачи, отличающиеся методом формирования линейного сигнала:

- использующие сигнал с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) типа $nB1Z$, где n – количество бит, передаваемых одним многоуровневым символом, Z – количество разрешенных амплитудных уровней символа ($Z = 2^n$);

- использующие сигнал с квадратурно-амплитудной модуляцией (QAM – Quadrature Amplitude Modulation) и амплитудно-фазовой модуляцией без несущей (CAP – Carrierless Amplitude and Phase Modulation) – варианты квадратурной модуляции АИМ сигналов.

В качестве критерия сравнительной оценки различных ЦСП использовалась величина максимально допустимой (предельной) длины участка регенерации, определяемая из равенства допустимой и ожидаемой помехозащищенности регенератора ЦСП. При этом допустимая помехозащищенность регенератора определялась в точке наибольшего возможного значения вероятности ошибки. Помехозащищенность зависит от допустимой вероятности ошибки, количества разрешенных амплитудных уровней импульсов сигнала и равна [13, 26]:

$$A_{з, доп} = 20 \lg(A_c / \sigma_n)_{доп} = 10,65 + 11,42 \lg(-\lg p_{ош доп}) + 20 \lg[(Z - 1) / 2], \quad (1)$$

где $p_{ош доп}$ – допустимая вероятность ошибки; Z – количество разрешенных амплитудных уровней импульсов; A_c и σ_n – амплитуда символа сигнала и действующее значение шума (помехи) в этой точке.

Ожидаемая защищенность регенератора ЦСП от суммарного воздействия статистически независимых источников помех определялась как:

$$\begin{aligned} A_{з\sum} &= -20 \lg\{\sum_{i=1}^N U_{пр i} / A_p\} = -10 \lg\{\sum_{i=1}^N U_{пр i}^2 / A_p^2\} = \\ &= -10 \lg\{\sum_{i=1}^N P_{пр i} R_p / A_p^2\} = -10 \lg\{\sum_{i=1}^N \text{dec}(-0,1 A_{з i})\} \end{aligned} \quad (2)$$

где $\text{dec}(x) = 10^x$; N – количество источников помех; A_p , $U_{пр i}$ и $P_{пр i}$ – соответственно амплитуда импульса сигнала, действующее напряжение и мощность i -ой помехи ($i \in [1; N]$) на входе решающего устройства (РУ) регенератора ЦСП; R_p – входное сопротивление РУ; $A_{з i}$ – защищенность от i -го источника шума (помехи), действующего на входе РУ.

Было показано [8, 10, 11], что основными источниками помех, влияющими на работу ЦСП, являются собственные шумы (собственные шумы корректирующего усилителя и тепловой шум прилегающего участка кабельной линии) и переходные влияния (ПВ), обусловленные электромагнитными связями между парами. Последние, в зависимости от направлений передачи и приема сигналов по влияющей и подверженной влиянию парам, делятся на ПВ на «ближний конец» (БК) и ПВ на «дальний конец» (ДК).

Для анализа степени воздействия каждой из составляющих суммарной помехи были разработаны [8, 10, 11, 13–15, 17, 21, 26]:

- математические модели характеристик кабельных линий (частотные характеристики затухания, ПВ на БК и ДК);

- математические модели перечисленных составляющих суммарной помехи;

- математические модели их воздействия на ЦСП с АИМ и CAP(QAM) сигналами при использовании линейных методов коррекции неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) прилегающего участка кабельной линии;

- проведено моделирование спектральных характеристик АИМ и CAP(QAM) сигналов.

В качестве примера можно привести следующие полученные обобщенные соотношения [26]:

а) защищенность регенератора от i -ой составляющей суммарной помехи:

$$A_{zi} = -10 \lg \left\{ \frac{C_n f_c}{P_c} \int_0^1 G_{\text{пр вх}i}(x) \psi^4(x) \text{dec} \left[0, 1 a_{\text{лс}} \sqrt{x} \right] dx \right\}, \quad (3)$$

где $\psi(x) = (\pi x/2) \text{ctg}(\pi x/2)$; $x = f/f_c$, f_c – символьная частота линейного сигнала, f – текущая частота; $C_n = 4/K_{\text{пл}}$, $K_{\text{пл}}$ – пик-фактор линейного сигнала, равный отношению максимальной мгновенной мощности сигнала к его средней мощности P_c ; $a_{\text{лс}}$ – затухание в дБ линейного тракта длиной l_p на частоте f_c ; $G_{\text{пр вх}i}(x)$ – спектральная плотность мощности i -ой помехи на входе регенератора;

б) спектральная плотность мощности АИМ сигнала [16, 17, 25]:

$$G(f) = \frac{C_n K_{\text{пл}} P_c}{f_c} \sqrt{|f|/f_c} \cos^2(\pi f/2f_c), f \in (0; f_c). \quad (4)$$

В дальнейшем полученные модели были использованы для разработки методик расчета предельной длины участка регенерации для двух- и четырехпроводных ЦСП с различными способами организации дуплексной связи и вариантами построения сети.

По способу организации дуплексной связи были рассмотрены варианты [14, 26]:

1) для двухпроводных ЦСП (использующих для работы 1 пару кабеля):

а) с однополосной дуплексной передачей (используется одна полоса частот для передачи сигналов в обоих направлениях, разделение направлений передачи осуществляется с помощью дифференциальных систем (ДС) и адаптивной эхокомпенсации (ЭК));

б) с двухполосной дуплексной передачей (используется частотное разделение направлений передачи);

2) для четырехпроводных ЦСП (использующих для работы 2 пары кабеля) [22, 23, 26]:

а) с однополосной полудуплексной передачей по каждой паре (используется отдельная пара для каждого направления передачи);

б) с однополосной дуплексной передачей по каждой паре;

в) с двухполосной дуплексной передачей по каждой паре.

Перечисленные способы использовались для анализа различных вариантов построения сети с одновременной работой нескольких ЦСП, в частности (для примера) [34]:

Вариант 1. Однокабельное построение с использованием четырехпроводных ЦСП и однополосной полудуплексной передачей по каждой паре.

Вариант 2. Двухкабельное построение с использованием четырехпроводных ЦСП и однополосной полудуплексной передачей по каждой паре.

Вариант 3. Однокабельное построение с использованием четырехпроводных ЦСП с однополосной дуплексной передачей по каждой паре.

Вариант 4. Однокабельное построение с использованием двухпроводных ЦСП с однополосной дуплексной передачей по каждой паре.

Вариант 5. Однокабельное построение с использованием четырехпроводных ЦСП с двухполосной дуплексной передачей по каждой паре.

Вариант 6. Однокабельное построение с использованием двухпроводных ЦСП с двухполосной дуплексной передачей по каждой паре.

С использованием разработанных методик получены результаты численных расчетов для указанных вариантов построения сети для различных условий, например, при совместной работе нескольких однотипных ЦСП (одинаковые способы организации дуплексной связи, скорости передачи и типы линейных сигналов) с АИМ и CAP(QAM) линейными сигналами в широких диапазонах изменения скорости передачи и числа разрешенных уровней сигнала. Исследована зависимость влияния на предельную длину участка скоростных и сигнальных параметров ЦСП с АИМ и CAP(QAM), а также характеристик кабельных линий (типов симметричных многопарных кабелей).

По полученным результатам была дана характеристика каждому из исследуемых вариантов построения сети и разработаны рекомендации по выбору конкретного варианта для различных случаев практического использования. Кроме того, были исследованы дополнительные, так называемые системные ограничения [12]:

а) ограничения, накладываемый системой дистанционного питания (ДП) удаленного оборудования ЦСП;

б) ограничения, накладываемые параметрами регенератора ЦСП (конечные усилительная и корректирующая способности линейных регенераторов, параметры (качество подавления эхосигнала) адаптивного ЭК) и др.

Дана численная оценка их влияния на предельную длину участка регенерации.

Следующий этап исследований был посвящен анализу построения сетей, в которых используется параллельная работа разнотипных ЦСП. В частности, рассматривался вариант работы на одном кабеле двух разнотипных двухпроводных систем, каждая из которых использует однополосную дуплексную передачу АИМ линейных сигналов. Разнотипные ЦСП в этом случае могут отличаться как скоростями исходных цифровых потоков, так и способами их преобразования в линейный сигнал. С целью большей наглядности рассматривались два частных случая [26, 36]

а) соседние ЦСП имеют одинаковые информационные скорости, но разные АИМ линейные сигналы, которые различаются по количеству разрешенных амплитудных уровней импульсов Z ;

б) соседние ЦСП используют одинаковые АИМ линейные сигналы, но имеют различные информационные скорости передачи.

Особенностью всех перечисленных случаев является различие спектральных плотностей мощности сигналов влияющей и подверженной влиянию систем передачи, что налагает дополнительные требования, предъявляемые к алгоритмам обработки и требует использования отдельных методик расчета.

С учетом этого были разработаны методики анализа совместной работы разнотипных ЦСП и получены численные результаты расчетов для широких диапазонов изменений скоростей передачи и числа разрешенных уровней АИМ сигнала и параметров кабельных линий. На основании анализа результатов сформулированы рекомендации по практическому использованию вариантов совместной работы разнотипных ЦСП на одной кабельной линии.

Обобщенный анализ результатов указанных этапов исследования позволил определить направления повышения эффективности существующих типов ЦСП абонентского доступа, предусматривающие использование альтернативных структурных построений ЦСП (структурный синтез) и алгоритмов обработки сигнала (параметрический синтез).

Были разработаны и исследованы эффективность следующих вариантов структурного синтеза для ЦСП абонентского доступа [20, 26–33, 36, 37, 40, 41]:

1) применение различных типов линейных сигналов для разных направлений при двухполосной дуплексной передаче: для низкочастотного направления передачи используется АИМ линейный сигнал, а для высокочастотного – CAP(QAM). Вариант построения защищен патентами на изобретения Республики Беларусь и Российской Федерации [27, 32];

2) использование адаптивной компенсации помехи от ПВ на БК «своей» второй пары четырехпроводных ЦСП с однополосной полудуплексной и дуплексной передачами [22];

3) использование для четырехпроводных ЦСП, работающих по одночетверочному кабелю, дополнительного тракта приемопередачи, так называемой фантомной цепи (ФЦ), в том числе:

– ФЦ для однополосной дуплексной передачи. Вариант построения защищен патентами на изобретения Республики Беларусь и Российской Федерации [29, 30];

– ФЦ для двухполосной дуплексной передачи. Вариант построения защищен патентами на изобретения [28, 33];

– ФЦ для однополосной полудуплексной передачи. Вариант построения защищен патентом на изобретения [31].

В качестве примера на рис. 1 представлена структура ЦСП с использованием ФЦ для однополосной дуплексной передачи, где ПРМ-ПРД модуль – модуль приема и передачи; УР – устройство разделения передаваемого цифрового потока (ЦП) на два подпотока (ПП); УО – устройство объединения двух принимаемых ПП в полный ЦП; ЛС – линия связи; T_n – линейный трансформатор.

Для перечисленных вариантов структурного синтеза разработаны методики расчета предельной длины регенерационного участка, пригодные для анализа ЦСП в широком

диапазоне скоростей передачи, для различных типов линейных сигналов, с учетом реальных условий эксплуатации. На основании методик произведены численные расчеты предельной длины и проведен анализ полученных результатов. Показано преимущества использования предложенных вариантов построения по сравнению с традиционными типами ЦСП, даны рекомендации по выбору конкретного построения из предложенных вариантов с учетом требований, налагаемых условиями практической эксплуатации.

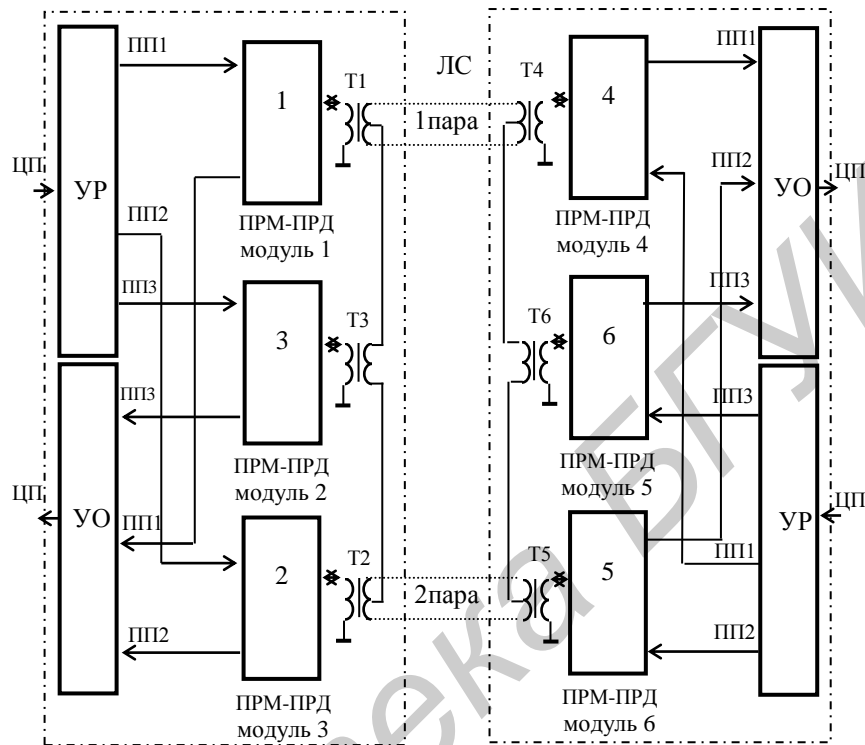


Рис. 1. Структурное построение ЦСП с использованием ФЦ для однополосной дуплексной передачи

Так, например, для варианта сети с однокабельным построением и использованием двухпроводных ЦСП с двухполосной дуплексной передачей по каждой паре было определено оптимальное соотношение числа разрешенных амплитудных уровней АИМ сигнала (низкочастотное направление передачи) и CAP(QAM) сигнала (высокочастотное направление передачи), обеспечивающее максимально возможную предельную длину участка для случая одновременной работы на кабеле нескольких однотипных ЦСП [26].

В качестве вариантов параметрического синтеза были обоснованы и выбраны следующие направления [26, 36, 37, 40, 41]:

1) использование методов помехоустойчивого кодирования передаваемого цифрового сигнала, обеспечивающих при заданных параметрах вероятности ошибки возможность снижения допустимой защищенности ЦСП на величину так называемого кодового усиления [36, 40, 41].

2) альтернативные методы коррекции неравномерности частотной характеристики прилегающего участка кабельного тракта (компенсации межсимвольных искажений (МСИ)) [26]:

а) использование предискажений передаваемого сигнала, обеспечивающих частичную или полную компенсации МСИ за счет использования преднамеренных частотных искажений сигнала на стороне передачи, которые компенсируют неравномерность АЧХ тракта [13, 26];

б) использование решающей обратной связи (РОС) – совместное использование алгоритмов неполной коррекции МСИ принимаемого сигнала и алгоритма построения РУ, позволяющего компенсировать нескорректированные искажения [13, 26];

в) совместное использование РОС и предыскажения [13, 26];

г) использование предварительного кодирования передаваемого сигнала по методу Томлинсона-Харашимы (THP – Thomlinson-Harashima precoding) – метод структурирования передаваемого сигнала, позволяющий обеспечивать компенсацию МСИ при использовании в тракте приема более простых алгоритмов коррекции АЧХ, которые не обеспечивают полную коррекцию МСИ (см., например, Fisher R., Gerstacker W., Huber J. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1995. P.1622-1633).

Для каждого из перечисленных направлений разработаны математические модели и методики расчета, осуществлена оптимизация параметров ЦСП. Так например при исследовании эффективности использования помехокорректирующего кодирования показана возможность выбора оптимального соотношения «кодовое усиление/избыточность», обеспечивающее увеличение длины регенерационного участка. При исследовании метода THP показаны преимущества его использования по сравнению с РОС, в частности – отсутствие эффекта размножения ошибок.

Подводя итог перечисленному, можно отметить, что основными результатами исследований является разработка методик анализа эффективности кабельных ЦСП абонентского доступа. Полученные методики пригодны для анализа ЦСП, использующих различные технологии передачи и варианты построения сети. Методики учитывают возможность повышения эффективности ЦСП по разработанным направлениям структурно-параметрического синтеза, при этом не исключают совместное использование указанных направлений. По результатам расчетов, полученных с использованием предложенных методик, сформулированы обобщенные рекомендации по практическому использованию технологий передачи, видов ЦСП и вариантов построения сети с учетом реальных условий эксплуатации. При этом практическое значение методики имеют не только для эксплуатирующих организаций, оказывающих телекоммуникационные услуги, но и для разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования.

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF SUBSCRIBER ACCESS DIGITAL SYSTEMS. CONDITION AND PROSPECTS

V.I. KIRILLOV, A.I. BELKO

Abstract

Briefly main results of the researches on analysis and structured-parametric syntheses of digital systems of subscriber access, which were got in BSUIR, are stated. The main trends of researches are indicated and the variants of the structured-parametric syntheses of the digital systems, which use different technologies of transmission and telecommunications networks buildings, are represented. The analysis of the received results was done and the recommendations on practical use was developed on the grounds of this analysis. The trends for perspective researches are formulated.

Список литературы

1. Кириллов В.И., Тарченко Н.В. Частотные корректоры систем телекоммуникаций. Минск, 1996.
2. Кириллов В.И. // Радиотехника. 1996. №11. С. 28–30
3. Кириллов В.И. // Электросвязь. 1996. № 11. С. 28–30
4. Кириллов В.И. // Электросвязь. 1997. №12. С. 32–35.
5. Кириллов В.И., Тарченко Н.В. Проектирование усилительных устройств многоканальных систем телекоммуникаций. Минск, 1999.
6. Кириллов В.И. // Веснік сувязі. 2000. № 5. С. 39–43.
7. Кириллов В.И. // Веснік сувязі. 2000. № 5. С. 25–27.
8. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2000. № 6. С. 23–28.
9. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2001. № 2. С. 38–41.
10. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2001. № 3. С. 44–47.
11. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. 2001. № 10. С. 20–23.

12. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2002. № 3. С. 16–21.
13. Кириллов В.И. Многоканальные системы передачи: Учебник. 2-е изд. М., 2003.
14. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2002. № 6. С. 17–23.
15. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь (Москва). 2002. № 11. С. 15–18.
16. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2002. № 9. С.25–31.
17. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2002. № 9. С.19–24.
18. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2003. № 3. С. 56–58.
19. Кириллов В.И., Пилушко А.А. Военные системы многоканальной проводной связи с частотным разделением каналов. Минск, 2003.
20. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. 2003. № 4. С. 26–30.
21. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь (Москва). № 10. 2003. С. 32–36.
22. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. № 5. 2003. С. 39–44.
23. Кириллов В.И., Белко А.И. // Докл. БГУИР. 2004. № 2 (6). С. 66–77.
24. Кириллов В.И., Белко А.И. // Веснік сувязі. № 2. 2004. С. 41–46.
25. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. № 2. 2005. С. 13–16.
26. Белко А.И. Дисс. ... канд. техн. наук. Минск, 2004.
27. Кириллов В.И., Белко А.И. Двухканальная цифровая система передачи / Патент РФ № 2259013.
28. Кириллов В.И., Белко А.И. Цифровая система передачи для четырехпроводной линии связи / Патент РФ № 2259014.
29. Кириллов В.И., Белко А.И. Четырехпроводная цифровая система передачи / Патент РФ № 2260909.
30. Кириллов В.И., Белко А.И. Четырехпроводная цифровая система передачи / Патент РБ № 9206.
31. Кириллов В.И., Белко А.И. Устройство преобразования сигналов для четырехпроводной цифровой системы передачи / Патент РБ № 9400.
32. Кириллов В.И., Белко А.И. Двухпроводная цифровая система передачи / Патент РБ № 9400.
33. Кириллов В.И., Белко А.И. Цифровая система передачи для четырехпроводной линии связи / Патент РБ № 9401.
34. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. 2005. № 10. С. 31–34.
35. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. 2005. № 12. С. 31–34.
36. Кириллов В.И., Белко А.И. // Докл. БГУИР. 2006. № 1 (13). С. 5–14.
37. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. 2006. № 6. С. 46–49.
38. Кириллов В.И. // Докл. БГУИР № 2 (18). 2007. С. 34–44.
39. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь. 2007. № 12. С. 31–35.
40. Кириллов В.И., Белко А.И. // Электросвязь (Москва). 2009 № 8. С. 37–41.
41. Кириллов В.И., Белко А.И. // Докл. БГУИР. 2009. № 6. С. 29–35.
42. Кириллов В.И., Белко А.И. // Докл. БГУИР. 2011. № 2 (56). С.62–69.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Кириллов Владимир Иванович (1939 г.р.), д.т.н., профессор. В 1963 г. окончил ЛЭТИ. В 1971 г. защитил кандидатскую, в 1993 г. – докторскую диссертацию. В настоящее время – профессор кафедры МиС БГУИР. Автор 490 научных работ, 40 авторских свидетельств и патентов на изобретения СССР, Республики Беларусь и Российской Федерации. Почетный радист СССР. Лауреат многих международных научно-технических выставок. Академик Международной академии информационных технологий. Награжден Почетным знаком «Отличник образования Республики Беларусь».



Белко Андрей Иванович (1972 г.р.), к.т.н., доцент. В 1991 г. окончил МРТИ. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 2001 г. работает в Могилевском филиале РУП «Белтелеком», в настоящее время занимает должность начальника центральной производственной лаборатории электросвязи центра технической эксплуатации. Доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств МГУП. Область научных интересов – цифровые системы и сети различного назначения. Автор более 50 научных работ, 7 патентов на изобретения Республики Беларусь и Российской Федерации.