

Т.А.РАДИШЕВСКАЯ¹, Д.В.РАДИШЕВСКИЙ²

НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ КЛАССИФИКАТОР ПРЕДАВАРИЙНЫХ СОСТОЯНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ НА ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

¹Государственное учреждение образования «Белорусская медицинская академия последипломного образования», ул. П. Бровки, 3 корп. 3, г. Минск, 220013, Республика Беларусь

²Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь

Поступила в редакцию

Аннотация. В работе описывается нейро-нечеткий классификатор предаварийных состояний оборудования на техногенных объектах, предназначенный для работы в составе инструментальных средств мониторинга промышленных объектов. Использован метод классификации на основе обработки признаков состояния оборудования с помощью математического аппарата нечетких множеств. Математической моделью метода является нейронная сеть прямого распространения, которая реализована в виде библиотеки подпрограмм в среде EasyBuilder Pro. Представлен способ фаззификации признаков и экранная форма, позволяющая в интерактивном режиме задавать базовые точки признаков и лингвистические правила их обработки

Ключевые слова: нейро-нечеткий классификатор; предаварийное состояние; инструментальные средства мониторинга промышленных объектов; фаззификатор; базовая точка

Abstract. The paper describes a neuro-fuzzy classifier of the pre-emergency conditions of equipment at technogenic facilities, designed to work as part of industrial monitoring tools. The classification method based on the processing of signs of equipment condition using the mathematical apparatus of fuzzy sets is used. The mathematical model of the method is a direct distribution neural network, which is implemented as a library of routines in the EasyBuilder Pro environment. A method of fuzzification of features and a screen form are presented, which allows interactively setting the base points of features and linguistic rules for their processing

Keywords: neuro-fuzzy classifier; pre-emergency conditions; industrial monitoring tools; fuzzifier; base point

Введение

На сегодняшний день промышленность Республики Беларусь стоит на пороге четвертой индустриальной революции (Индустрия 4.0), предусматривающей цифровую трансформацию национальной экономики как основной инструмент обеспечения качественного скачка производительных сил на более высокий уровень технологического развития народного хозяйства страны [1]. Там же цифровая трансформация определяется как деятельность (процесс и проект), направленную на интенсивное распространение использования ИКТ во всех отраслях экономики (видах экономической деятельности) с целью повышения эффективности и конкурентоспособности на макро- и микроуровнях.

Развитие экосистемы Промышленного Интернета Вещей должно базироваться на одном из шаблонов архитектуры ПоТ [2], обеспечивающим эффективное функционирование как существующей производственной инфраструктуры (ПИ), так и интероперабельной («бесшовной») цифровой инфраструктуры связи, обеспечивающей саму возможность функционирования Индустрии 4.0. Такая инфраструктура связи представляет собой распределенную телекоммуникационную систему (РТКС), способную функционировать с заданным уровнем качества обслуживания в реальных условиях эксплуатации (ограниченной пропускной способности каналов связи, сбоях электропитания, недетерминированным временем ожидания транзакций) при наличии технических отказов отдельных элементов РТКС.

Для обеих инфраструктур (ПИ и РТКС) в рамках концепции Индустрии 4.0 требуется решение двух взаимосвязанных задач: во-первых, обеспечение непрерывного функционирования технологических объектов в рамках внедрения системы управления производственными активами (СУПА) на основе принципа обслуживания оборудования по прогнозу его состояния (predictive Maintenance), и, во-вторых, обеспечение отказоустойчивого функционирования этих объектов в рамках системы оповещения об отказах (СОО). Ключевое отличие этих двух систем состоит в их быстродействии: СУПА может иметь низкое быстродействие и задействовать облачные ресурсы, а СОО должна выдавать оповещение оперативному персоналу в течении нескольких секунд и работать в пределах защищенной локальной сети предприятия (на периферии сетевой инфраструктуры).

ПИ и РТКС по назначению отличаются тем, что первая обеспечивает собственно автоматизацию производственных процессов, которая напрямую связана с номенклатурой применяемых программируемых логических контроллеров и/или распределенных систем управления, а вторая является обеспечивающей технологией для функционирования ПоТ. Цифровая трансформация традиционных отраслей промышленности при переходе к Индустрии 4.0 в первую очередь приводит к усложнению структуры РТКС, объекты которой к тому же становятся необслуживаемыми. Таким образом, классификация состояний оборудования РТКС, в отличие от ПИ, начинает сводиться к практической задаче мониторинга сети передачи данных предприятия, в частности контроля таких ее элементов, как Edge computing node (1 – 10 стоечный микро-ЦОД) и Edge networking node (телекоммуникационный шкаф с активным сетевым оборудованием и ИБП).

В работе описывается нейро-нечеткий классификатор (ННК) предаварийных (в рамках СОО) состояний оборудования на техногенных объектах, предназначенный для работы в составе инструментальных средств мониторинга РТКС и ПИ промышленных

объектов. Для построения таких инструментальных средств выбрана архитектура РТКС 4.0 [3] на основе шаблона архитектуры Промышленного Интернета Вещей с использованием Edge Gateway/Hub, причем Edge Gateway/Hub заменен на два типа устройств: Edge hub и Edge gateway. В качестве аппаратной платформы Edge hub выбран сервер сMT-SVR-100 тайваньской компании Weintek Labs, поддерживающий инновационную архитектуру «облачного» человеко-машинного интерфейса Cloud HMI [4]. Базовое серверное устройство сMT-SVR-100 является свободно программируемым, поддерживает стандартные протоколы промышленной автоматизации для более чем 300 типов программируемых логических контроллеров, и в него уже встроен брокер MQTT. Протокол MQTT является основным протоколом IoT (по сравнению с REST, JSON и другими) в связи с минимальным объемом служебной информации (оверхедом) и возможностью подписки облачных сервисов на различные топики.

Архитектура с использованием Edge hub и Edge gateway создает инфраструктуру IoT, которую принято называть edge computing (периферийные вычисления). Эта модель позволяет максимально приблизить вычисления к данным и источникам, которые их генерируют - приложениям и сервисам. Кроме того, одной из наблюдаемых тенденций последних лет стало понимание того, что технологии Big Data не обязательно требуют «подъема» всех данных в самый верхний слой Индустрии 4.0, а допускают «свертку» этих данных для получения интегральных критериев состояния производства. Опыт внедрения показывает, что при сборе с объектов РТКС 1000 признаков (тегов в терминологии SCADA-систем) передача «наверх» 250 тегов является избыточной для диспетчера, и он настоятельно просит выдать нечеткое состояние объекта. Кроме того, если признак не был обработан в течении первых сотен миллисекунд с момента его создания, то скорее всего он не будет обработан никогда.

ННК, базирующийся на линейке устройств сMT-SVR, позволяет создавать СУПА и СОО различного масштаба и функционального назначения без привязки к каким либо конкретным облачным сервисам, а использование устройств общепромышленного назначения позволяет не смешивать алгоритмы работы классификатора (а в перспективе и алгоритмы его обучения) с алгоритмами работы объектов ПИ. В связи с этим дальнейшее изложение основано на примерах, связанных с объектами РТКС.

Метод классификации базируется на основе обработки признаков состояния оборудования с помощью математического аппарата нечетких множеств и математической модели искусственной нейронной сети. Методы и алгоритмы обучения нейронной сети выходят за рамки данной работы.

Задача классификации оборудования

В связи с тем, что объекты РТКС сильнее поддаются типизации/унификации, чем объекты ПИ, дальнейшее изложение связано со спецификой объектов РТКС. Это объясняется тем, что для объектов РТКС номенклатура наблюдаемых признаков намного уже, чем для объектов ПИ. В частности, признаки уровня и спектрального состава вибрации, уровня шума, степени загрязнения материалов и другие подобные признаки характерны для установок машиностроения, энергетики, нефтехимии, но никак не для объектов информационно-коммуникационных технологий, все более уходящих в сферу SDx («программно-определяемого всего»). Однако в физическую (инженерную) инфраструктуру РТКС все еще входят объекты, свойства которых в значительной мере невозможно переопределить программно. Концепция виртуализации хорошо применима к понятиям SDN (Software Defined Network, программно-определяемые сети) и SDS (Software Defined Storage, программно-

определяемые хранилища данных), но не приводит к появлению программно-определяемых шкафов, стоек, кондиционеров, ИБП.

В связи с этим основным объектом мониторинга в РТКС становится телекоммуникационный шкаф (ТШ), состояние которого определяется следующими признаками: температура вверху/внизу шкафа, влажность вверху/внизу шкафа, наличие протечки (конденсата), датчик вскрытия шкафа и, наконец, процент заряда АКБ, установленной в ИБП, и время отсутствия сетевого напряжения на входе ИБП. Эти признаки имеют разную физическую природу, но они сильно взаимосвязаны, и связь устанавливается при помощи математического аппарата нечетких множеств [5, 6].

Введение нечеткости - фаззификация

Фаззификация проводится в отношении всех признаков, входящих в нейро-нечеткий классификатор. В соответствии с [5] будем называть этот признак лингвистической переменной, которая должна быть описана одним или несколькими лингвистическими терминами. В ННК используются следующие лингвистические термины:

- 1) LA («Low Alarm») – значение параметра ниже минимального порога аварии;
- 2) LW («Low Warning») – значение параметра ниже минимального порога предупреждения, но выше порога аварии;
- 3) G («Good») - значение параметра в норме;
- 4) HW («High Warning») – значение параметра выше максимального порога предупреждения, но ниже порога аварии;
- 5) HA («High Alarm») – значение параметра выше максимального порога аварии.

Такой алфавит позволяет привести все параметры разного типа (разного физического смысла) к набору однотипных лингвистических переменных, которые обрабатываются нейронной сетью. Если предположить, что элемент РТКС описывается набором из m признаков, то действующая нейро-нечеткая система классификации будет представлять собой нейронную сеть, в которой входной слой будет состоять из m фаззификаторов, далее будет следовать до m слоев с узлами, в которых лингвистические переменные сравниваются попарно. Отличием реализованного фаззификатора от традиционных решений является то, что каждый признак предварительно обрабатывается масштабатором (scaler) для приведения его к чисто цифровому (crisp) значению в диапазоне от 0 до 100.

Рассмотрим два связанных параметра: процент заряда АКБ не требует масштабирования, так как в любом случае он находится в пределах от 0 до 100%; время отсутствия сетевого напряжения на входе ИБП до 10 минут по экспертным оценкам линейно отображается на интервал 0 – 100, а более длительные временные интервалы дают значение 100. Далее лингвистические термины описываются функцией принадлежности, которая представляет собой кусочнолинейную функцию, определяемую таблицей точек. Каждая точка представляет собой пару значений переменной и степень принадлежности данных значений, разделенные запятой. Пары заключены в скобки и разделены запятыми. Например, функцию принадлежности с тремя точками для лингвистического термина G можно описать как

$$G: = (40,0; 0,0) (50,0; 1,0) (60,0; 0,0);$$

Если этот терм относится к признаку «влажность», то он описывает нормальное значение влажности от 40 до 60%. Таким образом можно определить все простые элементы, причем используется изменение только по линейному или треугольному закону. Точки задаются в порядке возрастания значения переменной, а функция принадлежности между соседними точками является линейной. Степень

принадлежности для каждого термина рассчитывается по четкому входному значению с помощью линейной интерполяции между двумя соответствующими соседними точками функции принадлежности.

Точки определяются при помощи базовых точек (BP1 – BP5), причем число этих точек равно числу лингвистических термов. Если значение лингвистической переменной меньше, чем первая базовая точка в таблице соответствия, все значения ниже первой точки в таблице соответствия должны иметь такую же степень принадлежности, как и определенная для первой точки. Если значение лингвистической переменной больше, чем последняя базовая точка в таблице соответствия, все значения больше последней точки в таблице соответствия должны иметь такую же степень принадлежности, как и определенная для последней точки. При настройке ННК базовые точки в функции принадлежности изменяются в интерактивном режиме.

Пример использования базовых точек для определения функций принадлежности приведен на рисунке 1.

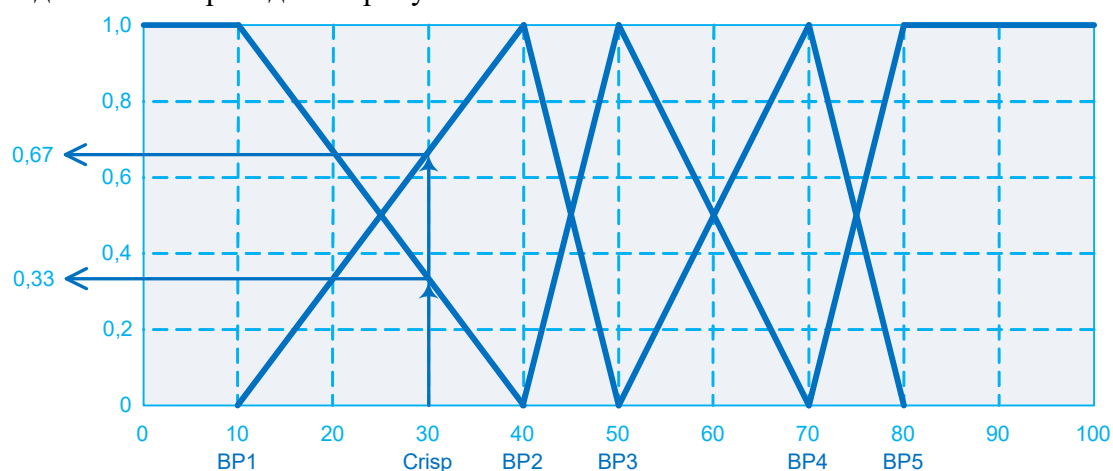


Рис. 1. Определение функций принадлежности при помощи базовых точек

На рисунке 1 также показано, что четкое (crisp) значение лингвистической переменной, равное 30, соответствует лингвистическому терму «L» с вероятностью 0,33, а терму «LW» - 0,67. Следует отметить, что треугольный закон не обязательно должен быть равнобедренным.

База лингвистических правил

Теория нечеткой логики применительно к задачам классификации состояний оборудования представляет собой технологию, обеспечивающую практическое применение знаний, представленных в базах лингвистических правил, что принципиально отличает нечеткие классификаторы от эмпирических или теоретических аналитических моделей. Более того, если нечеткий классификатор реализован в рамках математической модели нейронной сети с возможностью адаптации к среде, генерирующей признаки, то ННК способен извлекать знания из среды. Поскольку эти знания представлены в лингвистической форме, они могут легко интерпретироваться экспертом или лицом, принимающим решение (ЛПР). Это делает возможным использование новых знаний для усовершенствования технологических процессов и решения других задач, например, настройки параметров систем в интерактивном или автономном режиме, принятия решений в реальном времени, обнаружения и диагностики неисправностей систем.

Экранная форма, описывающая нейрон ННК, определяет два входных признака (соответственно две лингвистические переменные) с различными наборами базовых точек и набор лингвистических правил в виде матрицы 5x5 элементов. Выход каждого лингвистического правила является лингвистическим термом. В первом слое ННК входные параметры поступают от устройств Edge gateway, представляющим собой устройство сбора данных, взаимодействующее с физическими вещами либо через встроенные в вещи устройства переноса данных (например, модемы), либо напрямую. В случае, если физическая вещь (в терминологии IoT) поддерживает протокол MODBUS RTU (промышленные датчики температуры, влажности, кондиционеры, ИБП производства APC), то Edge gateway должен выполнять функции концентратора данных MODBUS и/или маршрутизатора интерфейсов MODBUS.

На рисунке 2 показан интерфейс экранной формы, обеспечивающей считывание и масштабирование двух параметров (сетевое напряжение на входе ИБП и процент заряда АКБ) по протоколу MODBUS RTU от ИБП производства APC [7].



Рис. 2. Экранная форма для ИБП

При построении экранной формы принято условие, что нечеткая операция *AND* означает *MIN*, а нечеткая операция *OR* означает *MAX*, тогда нечеткое правило R_j , основанное на комбинации *OR* из t утверждений, может быть представлено t правилами, утверждения которых комбинируются только с помощью *AND*. Для используемого в ННК случая двух входных переменных и одной выходной переменной, причем эти две входные переменные комбинируются только с помощью *AND*, база правил задается в форме матрицы, в которой значения входных переменных приведены в столбцах и строках, а поля матрицы содержат значения выходной переменной.

Дефаззификация

Результатом работы СОО является одна или несколько лингвистических переменных, отражающих состояние РТКС и в общем случае не требующих чисто числового представления, или дефаззификации. Наиболее частым требованием заказчиков является необходимость рассылки сообщений электронной почты на локальный SMTP-сервер в пределах изолированной локальной сети предприятия.

В отличие от СОО, СУПА должна поддерживать любые действия, направленные на поддержание или улучшение технического состояния оборудования, в том числе кроме непосредственно технического обслуживания и ремонта также управление материальными и техническими ресурсами предприятия. Для принятия управленческих решений на основании качественной оценки технического состояния оборудования в СУПА применяется его количественная оценка, которой является Индекс Технического Состояния (ИТС) [5].

На рисунке 3 показано наиболее часто встречающееся соответствие между качественной лингвистической (нечеткой, fuzzy) оценкой состояния оборудования и ее количественным (четким, crisp) аналогом. Следует отметить, что величина ИТС характеризует техническое состояние оборудования с точки зрения соответствия его параметров номинальным значениям, определяемой нормативно-технической (НТД) или конструкторской (КД) документацией.

Вид состояния	Критическое	Плохое	Удовлетворительное	Хорошее	Очень хорошее
Качественная оценка	Требуется срочное техническое воздействие, дальнейшая эксплуатация недопустима	Значение хотя бы одного параметра, связанного с реализацией функций оборудования, не соответствует НТД или КД. Требуется усиленный контроль состояния, эксплуатация возможна с ограничениями	Значение хотя бы одного параметра, связанного с реализацией функций оборудования, соответствует НТД и КД, однако близко к предельным значениям. Требуется усиленный контроль состояния	Воздействие осуществляется по результатам планового диагностирования	Воздействие не требуется и контроль осуществляется в рамках планового диагностирования
Диапазоны шкалы ИТС	$0 \leq \dots < 30$	$30 \leq \dots < 50$	$50 \leq \dots < 70$	$70 \leq \dots < 85$	$85 \leq \dots \leq 100$

Рис. 3. Таблица соответствия качественной и количественной оценок состояния оборудования

При таких диапазонах шкалы ИТС пять состояний оборудования отображаются на лингвистические термины ННК путем задания базовых точек 15; 40; 60; 77 (или 78); 92 (или 93). Числовое значение ИТС, которое получаем при дефаззификации, в текущей реализации ННК определяется методом центра тяжести для синглтонов [5].

Заключение

Нейро-нечеткий классификатор предаварийных состояний разработан в виде библиотеки функций фаззификации/дефаззификации и интерпретатора базы правил в программном пакете EasyBuilderPro [8], который является бесплатным и свободно распространяемым. Устройство для контроля и управления процессом выбирается в зависимости от поставленной задачи. Серия сМТ позволяет осуществлять доступ к проекту с трех устройств одновременно, расположенных в любом удобном для оператора месте. Благодаря программе сМТViewer есть возможность получить доступ к проекту с персонального компьютера или графического планшета (Android или iOS), которые находятся в одной локальной сети (Ethernet/Wi-Fi). Для управления и контроля процессом через Internet можно установить приложение EasyAccess 2.0, причем для этого не нужно использовать статический IP-адрес, настраивать маршрутизатор или конфигурировать отображения портов. Для сопряжения сМТ-SVR с Edge gateway авторами разработан драйвер протокола MODBUS RTU over Ethernet.

Список литературы

1. Крупский, Д. М. О концептуальных подходах к организации цифровой трансформации национальной экономики Беларуси / Д. М. Крупский // Цифровая трансформация. – 2018. – № 2 (3). – С. 29–36.

2. The Industrial Internet of Things. Volume G1: Reference Architecture. [Electronic resource]. Mode of access: www.iicinsortium.org/ИИЦ_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf. - Date of access: 12.09.2019.

3. Радишевская, Т. А., Радишевский, Д. В. Архитектура Промышленного Интернета Вещей для цифрового преобразования производства / Т. А. Радишевская, Д. В. Радишевский // Современные средства связи : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф., 17–18 окт. 2019 года, Минск, Респ. Беларусь ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : Белорусская государственная академия связи , 2019. – С. 43-44.

4. Шкляев Е. Технология CloudHMI компании Weintek // Современные технологии автоматизации. -2018. - № 1. С. 12-15.

5. IEC 61131-7. Programmable controllers – Part 7: Fuzzy control programming.

6. Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения. Fuzzy Technologies in the Industry (FTI-2017): Первая Всероссийская научно-практическая конференция (Россия, г. Ульяновск, 14-15 ноября, 2017 г.): сборник научных трудов. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 406 с.

7. Modbus Implementation in APC Smart-UPS. [Electronic resource]. Mode of access: https://www.apc.com/salestools/МРАО-98KJ7F/МРАО-98KJ7F_R0_EN.pdf. - Date of access: 10.11.2019.

8. EasyBuilder Pro User Manual Ver. 6.03.01. [Electronic resource]. Mode of access: https://dl.weintek.com/public/EBPro/UserManual/eng/EasyBuilderPro_V60301_UserManual_eng.pdf. - Date of access: 10.11.2019.

References

1. Krupsky D. M. On Conceptual Approaches to Digital Transformation of the National Economy of Belarus. *Cifrovaja transformacija* [Digital transformation], 2018, 2 (3), pp. 29–36 (in Russian).

2. The Industrial Internet of Things. Volume G1: Reference Architecture. [Electronic resource]. Mode of access: www.iicinsortium.org/ИИЦ_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf. - Date of access: 12.09.2019.

3. Radishevskaja T. A., Radishevskiy D. V. Arhitektura Promyshlennogo Interneta Veshhej dlya cifrovogo preobrazovaniya proizvodstva / T. A. Radishevskaja, D. V. Radishevskiy // Sovremennye sredstva svjazi : materialy XHIV Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., 17–18 okt. 2019 goda, Minsk, Resp. Belarus' ; redkol. : A. O. Zenevich [i dr.]. – Minsk : Belorusskaja gosudarstvennaja akademija svjazi , 2019. – S. 43-44.

4. Shklyayev E. Weintek CloudHMI technology // Sovremennye tehnologii avtomatizacii. -2018. - № 1. S. 12-15.

5. IEC 61131-7. Programmable controllers – Part 7: Fuzzy control programming.

6. Nechetkie sistemy i mjagkie vychislenija. Promyshlennye primenenija. Fuzzy Technologies in the Industry (FTI-2017): Pervaja Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija (Rossija, g. Ul'janovsk, 14-15 nojabrja, 2017 g.): sbornik nauchnyh trudov. – Ul'janovsk : UIGTU, 2017. – 406 s.

7. Modbus Implementation in APC Smart-UPS. [Electronic resource]. Mode of access: https://www.apc.com/salestools/MPAO-98KJ7F/MPAO-98KJ7F_R0_EN.pdf. - Date of access: 10.11.2019.

8. EasyBuilder Pro User Manual Ver. 6.03.01. [Electronic resource]. Mode of access: https://dl.weintek.com/public/EBPro/UserManual/eng/EasyBuilderPro_V60301_UserManual_eng.pdf. - Date of access: 10.11.2019.

Сведения об авторах

Радишевская Т.А., старший преподаватель кафедры финансового менеджмента и информатизации здравоохранения Белорусской медицинской академии последипломного образования

Радишевский Д.В., магистрант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Information about the authors

Radishevskaja T. A., senior teacher of the Department of Economics and Health Informatics of the Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education

Radishevskiy D. V., master's student of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Адрес для корреспонденции

Адрес: г. Минск, ул. П. Бровки, д.3, к.3, 702-707

Белорусская медицинская академия последипломного образования

Телефон: (+375 29) 756-32-51

e-mail: rta1504@mail.ru

Радишевская Татьяна Александровна

Address for correspondence

Address: 220013, Republic of Belarus, Minsk, P.Brovki str. 3, building 3 , 702-707

Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education

Phone: (+375 29) 756-32-51

e-mail: rta1504@mail.ru

Radishevskaja Tat'jana Aleksandrovna