

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

Туровский Я.А.

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия,
Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия*
yaroslav_turovsk@mail.ru

Суровцев А.С.

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
alexandr_surovtsev@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача прогнозирования variability сердечного ритма при проведении непрерывного медицинского наблюдения за функциональным состоянием человека-оператора. Проведено исследование точностей составляемых прогнозов при использовании линейной регрессионной модели, многослойного перцептрона и LSTM-нейронных сетей.

Ключевые слова: надежность и противоаварийная безопасность эргатических систем, прогнозирование функционального состояния человека-оператора.

Введение

В работе [1] для повышения надежности и противоаварийной безопасности эргатических систем разработана система поддержки принятия решений (СППР). СППР выполняет непрерывное наблюдение за состоянием технологического процесса и медицинское наблюдение за функциональным состоянием (ФС) человека-оператора и выбирает режим управления (автоматический или автоматизированный) технологическим процессом. СППР выбирает автоматический режим управления (без участия человека-оператора) технологическим процессом, когда $T_{\text{необходимое}}$ (время, необходимое на перевод технологического процесса из предотказного [2] (предаварийного состояния) в автоматизированном режиме (с участием человека-оператора)) меньше $T_{\text{доступное}}$ (время, доступное на перевод). Оценка $T_{\text{доступное}}$ вычисляется по результатам анализа информации от набора датчиков полевого уровня [3] автоматизированного предприятия. $T_{\text{необходимое}}$ представляет собой сумму $T_{\text{измерит_прибора}}$ (времени отклика измерительного прибора), $T_{\text{человека}}$ (время выработки и исполнения управленческого решения человеком-оператором) и $T_{\text{исполнительного_механизма}}$ (задержки исполнительного механизма системы ручного управления технологическим процессом). $T_{\text{измерит_прибора}}$ и $T_{\text{исполнительного_механизма}}$ определяются параметрами технологического процесса. $T_{\text{человека}}$ является показателем эффективности трудовой деятельности человека-оператора и вычисляется по результатам медицинского наблюдения человека-оператора.

Эффективность деятельности человека-оператора – его свойство, которое характеризует вероятность принятия им ошибочного управленческого решения и латентное время его действий [4]. Латентное время действий (ЛВД) человека-оператора при управлении технологическим процессом – интервал времени с момента получения им информации от органов чувств до момента выработки управленческого решения. Одним из способов снижения вероятности принятия ошибочного решения человеком-оператором является повышением уровня его профессиональной подготовки. Латентное время действий человека-оператора зависит от его функционального состояния. В процессе трудовой деятельности оператор подвергается различным нагрузкам. Набор нагрузок определяется технологическим процессом, в работу которого вовлечен оператор. Каждый человек индивидуален с точки зрения работы регуляторной системы. Поэтому изменения функциональных состояний различных операторов-технологов могут отличаться, даже если они выполняют одинаковую работу. Следует отметить, что на функциональное состояние человека оказывают влияние не только физические, но и психологические нагрузки (например, принятие решения в условиях дефицита времени, монотонность работы, психологическая несовместимость с коллегами по работе и другие стрессогенные факторы). Поэтому, как минимум, психологический баланс человека может вносить коррективы в функциональное состояние человека-оператора. Кроме этого, на функциональное

¹ Работа поддержана грантом РФФИ № 2023-0009.

состояние человека помимо производственных нагрузок, характеризующих трудовую деятельность, оказывают влияния множество других факторов.

Одним из способов получения оценки ФС человека-оператора является анализ биомедицинских сигналов человека-оператора таких, как: 1) биоэлектрическая активность головного мозга человека; 2) активность изменения оптической ориентации глазного яблока человека; 3) электрическая активность кожи человека; 4) вариабельность сердечного ритма (ВСР) человека и др. Регистрация сердечных ударов человека может производиться как электрокардиографом, так и пульсометром, закрепленным либо на пальце, либо на запястье, либо на грудной клетке и т.д. В большинстве случаев стоимость электроэнцефалографов несколько выше стоимости пульсометров. Изменение уровня освещенности в помещении, в котором находится человек-оператор, влияет на количество интервалов времени, в течение которых отслеживание «ориентации оптической оси глазного яблока» человека невозможно, но практически не влияет на точность регистрации сердечных ударов человека. Поэтому для получения оценки эффективности трудовой деятельности человека-оператора в данной работе будем выполнять медицинский анализ ФС человека-оператора посредством цифровой обработки записи его ВСР. Запись пульса (или регистрацию ударов сердца) человека-оператора можно производить непрерывно на протяжении всего его рабочего дня без причинения ему больших неудобств, а предложенный способ оценки функционального состояния позволит получать непрерывную оценку изменения функционального состояния человека-оператора, оценку эффективности его деятельности и оценку латентного времени его действий ($T_{\text{человека}}$). Прогнозирование ФС позволит повысить надежность и противоаварийную безопасность эргатических систем за счет того, что система сможет заранее определить, что $T_{\text{доступное}}$ будет недостаточно для успешного перевода технологического процесса из предотказного (предаварийного) в состояние нормального функционирования и заблаговременно запустить соответствующие механизмы системы безопасности для предотвращения возникновения аварии.

Целью данной работы является выбор модели для прогнозирования эффективности трудовой деятельности человека-оператора при медицинском контроле функционального состояния человека-оператора.

1. Прогнозирования вариабельности сердечного ритма человека-оператора

ВСР – ряд интервалов времени между двумя последовательными зарегистрированными сердечными ударами. Нередко удар сердца определяют по зубцу-R на ЭКГ, а интервал между соседними сердечными ударами называют RR -интервалом.

Составление прогноза ВСР человека – прогнозирование временного ряда его кардиоинтервалов. Запись сигнала ВСР человека можно получать с помощью различного контрольно-диагностического оборудования, такого как электрокардиограф или пульсометр. Результатом работы большинства такого оборудования является некоторый цифровой сигнал. Далее без потери общности из всего многообразия контрольно-диагностического оборудования будем рассматривать пульсометры, так как цифровые сигналы от большинства контрольно-диагностического оборудования, которое может быть использовано для получения сигнала ВСР, содержат оценку о связанных биомедицинских процессах. Электрокардиограф регистрирует напряженность электрического поля, которое образуется при работе сердца человека и называется кардиограммой. Пульсометр производит сигнал, который называется пульсограмма. Пульсограмма – запись оценки изменения объема крови в сосудах некоторой области человеческого тела. Сокращение сердца человека вызывает повышение уровня напряженности электрического поля и объема крови в сосудах человека в окрестностях момента времени этого сокращения. Моменты времени пиков пульсовой волны на сигнале записи, получаемой от пульсометра, или «зубцов» (например, r -зубцов) на электрокардиограмме можно считать моментами времени сокращения сердца. Тогда ВСР – временной ряд между интервалов времени между последовательными пиками пульсовой волны или между последовательными r -зубцами на кардиограмме.

Сигналы от большинства пульсометров (и кардиографов) могут содержать так называемые «артефакты». «Артефакты» представляют собой помеху в записи пульсограммы (или кардиограммы). Эти помехи могут настолько «искажать» сигнал, что алгоритмы определения пиков пульсовой волны будут давать «ложноположительные» и «ложноотрицательные» результаты. Другими словами, ряд ВСР человека-оператора, который вычисляется этим алгоритмом, может содержать как лишние a_{n1} значения во временном ряду, так и в нем может недоставать некоторых a_{n2} . Поэтому требуется, чтобы

точность прогноза, составленного этой математической моделью, как можно меньше снижалась при наличии как лишних, так и при отсутствии некоторых элементов ряда ВСР человека-оператора. Для оценки точности составленных прогнозов наиболее часто используют среднюю абсолютную ошибку в процентах (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) и среднеквадратичную ошибку (Root Mean Square Error, RMSE).

Прогнозирование временных рядов выполняют с использованием следующих математических моделей: 1) регрессионных и авторегрессионных; 2) нейросетевых; 3) цепей Маркова; 4) деревьев принятия решений и др. Каждая из этих моделей имеет свои преимущества и недостатки перед остальными моделями. В данной работе проведем анализ результатов прогнозирования временных рядов с использованием линейной регрессионной модели, многослойного персептрона и нейросети с LSTM-узлами.

2. Программный пакет для оценки результатов прогнозирования ВСР человека-оператора

Для проведения исследования используется база записей ВСР 50 обоих полов в возрасте от 18 до 60 без заболеваний сердечно-сосудистой системы. В базе содержится по одной записи ВСР для каждого человека. Записи имеют длину от 70000 до 150000 кардиоинтервалов. Из каждой записи ВСР выделяем 30000 последовательных кардиоинтервалов для обучающей и 30000 последовательных кардиоинтервалов для тестовой выборки. Множество кардиоинтервалов, которые входят в обучающую выборку, не пересекаются с множеством кардиоинтервалов из тестовой выборки.

Для изучения влияния наличия «ложноположительных» и «ложноотрицательных» результатов детектирования сердечных ударов в обучающей выборке на результаты прогнозирования формируется набор из определенного количества обучающих выборок: 1) 10 выборок с имитацией наличия «ложноотрицательными» результатов детектирования ударов сердца (от 10 до 1 % с шагом в 1 %); 2) обучающая выборка без каких-либо изменений; 3) 10 выборок с имитацией наличия «ложноположительных» результатов детектирования ударов сердца (от 1 до 10 % с шагом в 1 %). Выборки с «ложноотрицательными» результатами детектирования сердечных ударов формируются посредством удаления определенного количества произвольно выбранных кардиоинтервалов, а выборки с «ложноположительными» результатами – посредством копирования определенной доли произвольных кардиоинтервалов в произвольные позиции ряда ВСР обучающей выборки. Каждая модель обучается с использованием только одной тестовой выборки. Таким образом, при работе с одним сигналом: 1) формируется 21 обучающая выборка и одна тестовая выборка; 2) составляется 63 модели для прогнозирования – по три модели (линейно регрессионная, многослойного персептрона и нейронная сеть с LSTM-узлами) для каждой обучающей выборки; 3) для каждой из этих моделей составляется набор прогнозов с использованием тестовой выборки и вычисляются метрика точности прогноза. В качестве метрики точности прогнозирования используется набор из MAPE и RMSE (см. предыдущий параграф). Из результатов работы [5] используются следующие пункты; 1) эпоха анализа всех моделей составляет 30 кардиоинтервалов; 2) модель выдает прогноз на 1 кардиоинтервал, прогноз на большее количество кардиоинтервалов рассчитывается рекуррентным способом; 3) прогнозы составляются на 30 кардиоинтервалов.



Рис. 1. Алгоритм вычисления результатов прогнозирования

Следует отметить, что перед формированием обучающих и тестовых выборок, сигналы ВСП подвергались двум преобразованиям: 1) удалению высокочастотной составляющей сигнала ВСП (ВЧ, от 0.15 до 0.4 Гц); 2) линейному отображению области значений, чтобы она стала равной отрезку $[0;1]$. Колебания ВЧ ВСП сопряжены с дыханием человека [5], которое может им произвольно управляться. Экспериментальным путем установлено, что получение более точных прогнозов достигается после удаления ВЧ ВСП. ВЧ ВСП удаляется с использованием скользящей средней. Линейное отображение области значений продиктовано необходимо повышению точности вычислений с плавающей точкой в моделях прогнозирования. На рис. 1. показан алгоритм вычисления результатов прогнозирования. Результаты прогнозирования объединяются по способу формирования обучающей выборки (например, обучающая выборка сформирована посредством удаления 3% кардиоинтервалов или добавления 7%) и рассчитывается 25, 50 и 75 перцентиль их MAPE и RMSE (рис. 2.). То есть, каждая точка на графике – перцентиль, рассчитанный по результатам прогнозирования 150 (по три (линейно регрессионная, многослойного перцептрона и нейронная сеть с LSTM-узлами) на каждый из 50 сигналов ВСП) из 3150 ($3 * 21 * 50$) моделей.

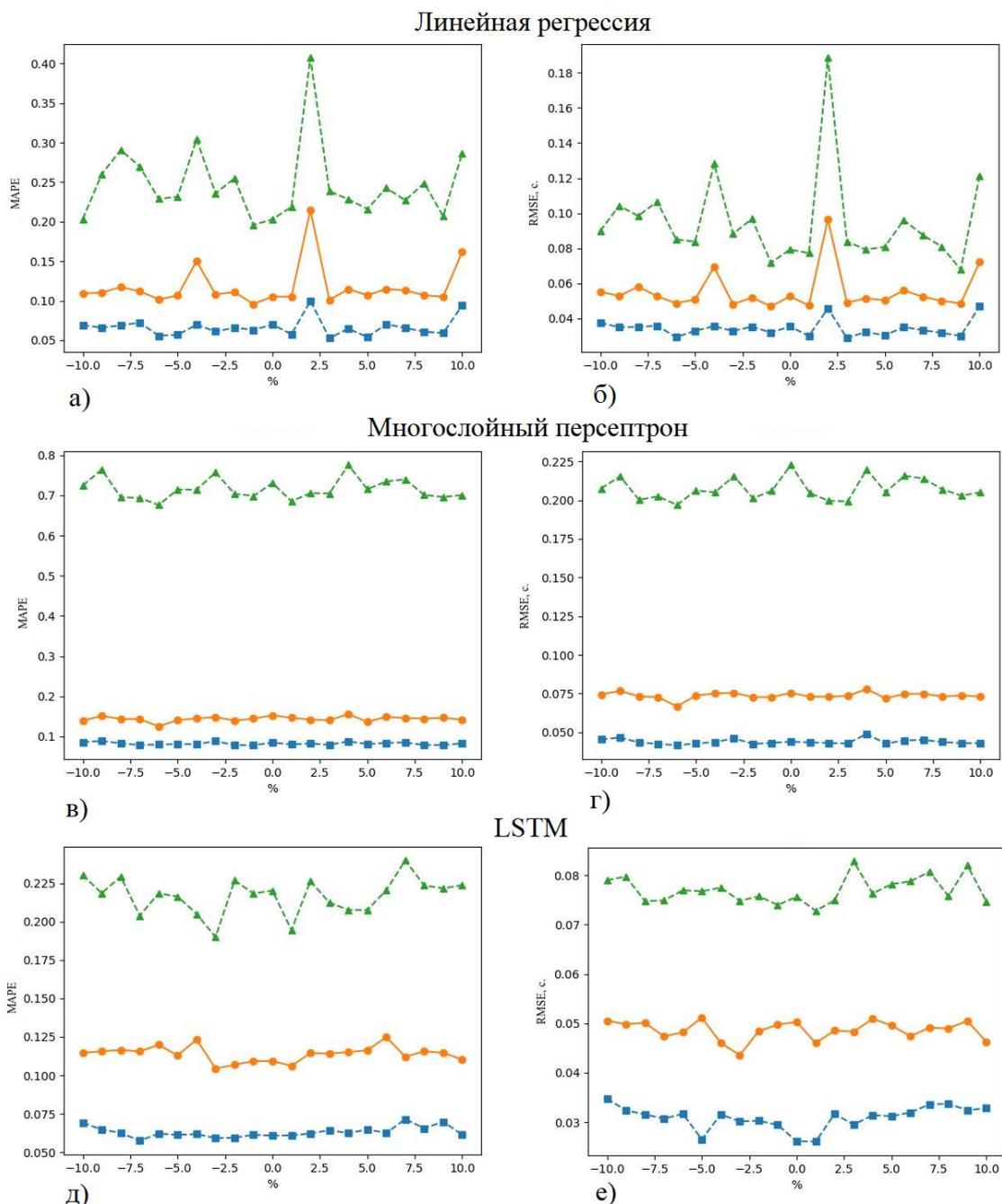


Рис. 2. Результаты прогнозирования

По графикам на рис. 2 видно, что медианы MAPE прогнозов, составленных многослойным перцептроном и нейронными сетями с LSTM-узлами находятся в интервале от 0.1 до 0.2 (графики в и д на рис. 2), но верхний квантиль у многослойного перцептрона расположен выше. А верхний квантиль RMSE линейно регрессионной модели (график б на рис. 2) находится выше верхнего квантиля RMSE нейронной сети с LSTM-узлами (график е на рис. 2). Следовательно, нейронная сеть с LSTM-узлами «в среднем» позволяет получить немного лучшие прогнозы. Однако, существенного снижения точности прогнозирования при наличии «ложноположительных» или «ложноотрицательных» результатов детектирования сердечных ударов при расчете ВСП не наблюдается (графики а – е на рис. 2).

3. Заключение

В данной работе рассмотрена задача повышения надежности эргатических систем при использовании СППР, которая выбирает режим управления технологическим процессом исходя из данных, полученных по результатам медицинского наблюдения функционального состояния человека-оператора. Для повышения надежности в этой работе осуществляется прогнозирование эффективности трудовой деятельности человека-оператора. Для прогнозирования эффективности деятельности человека-оператора принято решение составлять прогноз ВСП. Исходя из того, что сигналы от контрольно-диагностическое оборудования, которое может быть использовано для расчета ВСП, на текущем уровне развития технологий неизбежно содержат помехи, принято решение изучить изменение точности прогнозов при наличии в ряду ВСП так называемых «ложноположительных» и «ложноотрицательных» результатов детектирования ударов сердца. Существенного снижения точности прогнозирования (при наличии до 10 % «ложноположительных» или до 10 % «ложноотрицательных» результатов детектирования сердечных ударов) при использовании рассматриваемых моделей обнаружено не было, а более точные прогнозы составляются с использованием нейросетевой модели с LSTM-узлами.

Литература

1. Туровский Я. А., Суровцев А. С., Авцинов И. А. Способ повышения надежности и противоаварийной безопасности эргатических систем // Управление и развитие крупномасштабных систем: Труды пятнадцатой международной конференции.– М.: ИПУ РАН. 2022. – С. 975-979.
2. Балакирев В.С., Большаков А.А. Надежность и диагностика автоматизированных систем: Учебное пособие для вузов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2018. – 144 с.
3. Сердцева А. В. Развитие автоматизированных систем управления технологическими процессами // Вестник УлГТУ. 2016. N 3. – С. 58-61.
4. Фугелова Т. А. Инженерная психология: учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Изд-во Юрайт. 2023. – 316 с.
5. Бокерия Л. А., Борекля О. Л., Волковская О. Л. Вариабельность сердечного ритма: методы измерения, интерпретация, клиническое использование // Аритмология. 2009. N 4. – С. 21-32.
6. Туровский Я. А., Авцинов И. А., Суровцев А. С. Оценка возможностей линейных регрессионных моделей в задачах прогноза вариабельности сердечного ритма // Управление развитием крупномасштабных систем. MLSD-2019. Материалы 12 международной конференции. – М.: ИПУ РАН. 2019. – С. 463-465.