

Применение обобщенной графоаналитической модели в построении полумарковской модели подсистемы мониторинга и управления системы электроснабжения метрополитена

А. В. Давыдова✉, А. К. Канаев

Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

✉ av-davydova-pgups@yandex.ru

Аннотация. Повышение эффективности работы подсистем мониторинга и управления электроэнергетики обусловлено внедрением интеллектуальных технологий в рамках новых концепций. При проведении работ по модернизации объектов электроснабжения важным этапом является подготовка качественного анализа процессов функционирования и восстановления объекта. В статье представлена полумарковская модель, позволяющая анализировать объект модернизации, а также представить варианты соотношений параметров объекта с перспективой расширения функциональных возможностей за счет регулирования структуры и самих параметров. Построенная полумарковская модель подсистемы мониторинга и управления системы электроснабжения метрополитена на основе теории графов и с применением метода производящих функций позволяет представить взаимосвязи состояний системы электроснабжения и определить важные для обоснования оценки степени достижения требований соотношения по вероятности восстановления, времени восстановления и необходимому объему средств диагностирования.

Ключевые слова: система мониторинга, Smart Grid, граф, моделирование, производящая функция, вероятность восстановления, надежность

Для цитирования: Давыдова А. В., Канаев А. К. Применение обобщенной графоаналитической модели в построении полумарковской модели подсистемы мониторинга и управления системы электроснабжения метрополитена // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 4. С. 78–88. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-78-88.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Application of a Generalized Graphical-Analytical Model in Building a Semi-Markov Model of the Monitoring and Control Subsystem of the Subway Power Supply System

А. В. Давыдова✉, А. К. Канаев

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint Petersburg, Russia

✉ av-davydova-pgups@yandex.ru

Abstract. Improving the efficiency of the monitoring and control subsystems of the electric power industry is due to the introduction of intelligent technologies within the framework of new concepts. When carrying out work on the modernization of power supply facilities, an important stage is the preparation of a qualitative analysis of the processes of functioning and restoration of the facility. The article presents a semi-Markov model that allows you to analyze the object of modernization, as well as present options for the relationship of the parameters of the object with the prospect of expanding functionality by regulating the structure and the parameters themselves. The constructed semi-Markov model of the monitoring and control subsystem of the subway power supply system based on graph theory and using the method of generating functions makes it possible to present the interconnections of the states of the power supply system and determine the ratios that

are important for substantiating the assessment of the degree of achievement of the requirements for the probability of recovery, recovery time and the required amount of funds diagnosis.

Keywords: monitoring system, Smart Grid, graph, modeling, generating function, recovery probability, reliability

For citation: Davydova A. V., Kanaev A. K. Application of a Generalized Graphical-Analytical Model in Building a Semi-Markov Model of the Monitoring and Control Subsystem of the Subway Power Supply System // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 4. P. 78–88. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-4-78-88.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Повышение эффективности использования электроэнергии, необходимость автоматизации процессов функционирования и саморегулирования относятся к основным задачам построения интеллектуальной энергосистемы, реализуемым в современных концепциях Smart Grid, microgrid, Internet of Things. Они рассматриваются как комплекс, охватывающий области от генерации электроэнергии до взаимодействия систем со стейкхолдерами, задавая построение новых энергосистем и модернизацию существующих [1], [2]. Опыт внедрения концепции Smart Grid показывает, что наиболее часто применяемые стратегии внедрения определены точечным либо локально ограниченным введением новых технологий [3]–[5]. Цифровизация подстанций – это неотъемлемая часть внедрения новых концепций, в ходе которой ставятся цели, связанные с обеспечением надежности и бесперебойности функционирования систем электроснабжения при применении программных комплексов и современного оборудования для мониторинга и управления [6]–[8]. На примере Единого диспетчерского центра Московского метрополитена программы «Цифровое метро», введенного в 2019 г., видны показательные результаты, отражающие перспективы внедрения новых технологий и методов. Исходя из опубликованных отчетов, с этого времени наблюдается на 30 % больше информации для принятия руководящих решений, снижение на 15 % количества отказов, сокращение более чем на 50 % времени оперативной реакции для 208 объектов, внесение в систему поддержки принятия решения 129 сценариев устранения нарушений работы, 367 ч экономии времени, потраченного на устранение инцидентов.

Рассматривая вопрос надежности функционирования электротехнических систем, исследования в [9]–[13] к основным методам относят дерево отказов, сети Петри, марковский и графовый полумарковский методы. Непосредственно полумарковский метод сочетает в себе свойства мар-

ковских процессов и процессов восстановления с учетом того, что время пребывания процесса в каком-либо состоянии – случайная величина, распределение которой зависит от этого состояния и от состояния, в которое будет осуществлен следующий переход процесса. В ходе применения полумарковского метода выявляется множество устойчивых состояний объекта исследования посредством анализа процесса функционирования, множество взаимосвязей (переходов) между данными состояниями и определяются (в том числе из опыта эксплуатации) вероятностные и временные характеристики состояний, что позволяет построить графоаналитическую модель и рассчитать с помощью метода производящих функций зависимость относительно вероятности восстановления. Использование данного метода не может быть ограничено областью его применения, поскольку он универсален, что подтверждается в [10], [11], и используется в технических, производственных, энергетических, информационных областях для комплексного анализа большой системы, сложной по своей структуре, архитектуре и имеющей систему мониторинга и управления.

За последние пять лет можно выделить работы, в которых показательно применен полумарковский метод. Например, в [14] с его помощью дается оценка стационарных показателей надежности электровозов с асинхронным двигателем переменного тока, а в области энергетики – исследования [15]–[17], в которых отмечается, что построение полумарковской модели позволяет проанализировать процесс функционирования систем энергетики с учетом показателей надежности, мониторинга, обслуживания, прогнозирования, а также создания программного обеспечения на основе результатов моделирования. Также рассматривается применение этого метода при отключении рабочего элемента на период проведения контроля технической системы и представлен сравнительный расчет с подтверждением

точности моделирования [18]. Проведенный в [19] анализ надежности и расчеты позволяют авторам сделать вывод о необходимости применения результатов моделирования с полумарковской моделью при проектировании и решении оптимизационных задач. В свою очередь, на примере функционирования релейной защиты энергосистемы в [20], представлен алгоритм построения полумарковской модели с применением теории графов, в результате построения которой можно рассчитать и спрогнозировать коэффициент неготовности, частоту восстановления, частоту регулярных проверок, что предоставляет возможность формирования требований к надежности при имеющихся ресурсах.

Применение данного метода для системы электроснабжения метрополитена позволит рассмотреть процесс функционирования более комплексно, вместе с подсистемой мониторинга и управления и рабочим персоналом, сформировать группы отказов в соответствии с природой их возникновения, области обнаружения и взаимного влияния.

Проекты цифровизации подстанций требуют подготовки решения о необходимости модернизации и проведения предпроектных работ, которые должны быть технически обоснованы, включать в себя проведение качественного анализа объекта, сравнение показателей систем традиционного исполнения и современных, определение и подтверждение природы возникновения нарушений, разработку предложений по нормализации параметров и оптимизации работы в целом. Данное мероприятие выносится в отдельную процедуру закупки, что сопровождается выделением дополнительного финансирования, увеличением длительности подготовки документации. В свою очередь, выполнение данных работ сторонними организациями говорит о том, что существующие подсистемы контроля метрополитена не имеют достаточного измерительного и вычислительного ресурсов для подготовки всей необходимой информации об объекте в рамках инженерных изысканий и предпроектных работ.

На основании этого необходимо разработать модель, позволяющую сформировать обоснованное соотношение требований для определения оптимального пути модернизации объекта или системы, оценить степень достижения требований, а также способствующую сокращению времени на проведение предпроектных работ. Предлагается одним из компонентов этой модели за-

ложить полумарковскую модель с применением теории графов и метода производящих функций.

Постановка задачи. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач: охарактеризовать системы электроснабжения метрополитена и существующие подсистемы мониторинга, сформировать перечень состояний, определить структурные взаимосвязи состояний, построить граф состояний, построить зависимости вероятности восстановления от времени, объема средств диагностирования и ошибок 1-го и 2-го рода по методу производящих функций.

Характеристика системы электроснабжения и существующих подсистем мониторинга и управления метрополитена. Система электроснабжения метрополитена представляет собой сложную электротехническую систему, питающую оборудование с разными уровнями напряжения. Она создается на децентрализованной системе питания, построение усложняется индивидуальными особенностями питания смежных подстанций. В данной статье будут рассмотрены только совмещенные тягово-понижительные подстанции (СТП), обобщенная схема которых представлена на рис. 1. На схеме: ВВ – высоковольтный выключатель; ТСЦБ – трансформатор сигнализации централизации блокировки; ТСК – тяговый трансформатор; ТС – трансформатор силовой; ТО – трансформатор освещения; КВ – кремниевый выпрямитель; КА – катодный автомат; Р – разъединитель; ЩС, ЩО – щиты: силовой, освещения; ЩПТ – щит постоянного тока; АСШ – аварийная секция шин; АБ – аккумуляторная батарея; ЗПУ – зарядно-подзарядное устройство. Каждое распределительное устройство представляет собой сборный блок ячеек, куда входит оборудование для подключения, передачи, преобразования и распределения электроэнергии. Система электроснабжения тяги поездов – наиболее ресурсоемкий (порядка 80 %) и ответственный комплекс, который включает в себя распределительные устройства 6 (10) кВ, преобразовательные агрегаты, распределительное устройство постоянного тока 825 В, тяговую сеть.

Система электроснабжения тяги поездов и подвижной состав находятся во взаимном влиянии, например снижение напряжения в тяговой сети увеличивает расход электроэнергии, снижает КПД электропоезда, а неравномерность потребления электроэнергии вследствие различий характеристик электроприводов подвижного состава и броски тока при трогании негативно влияют на оборудование системы электроснабжения тяги поездов.

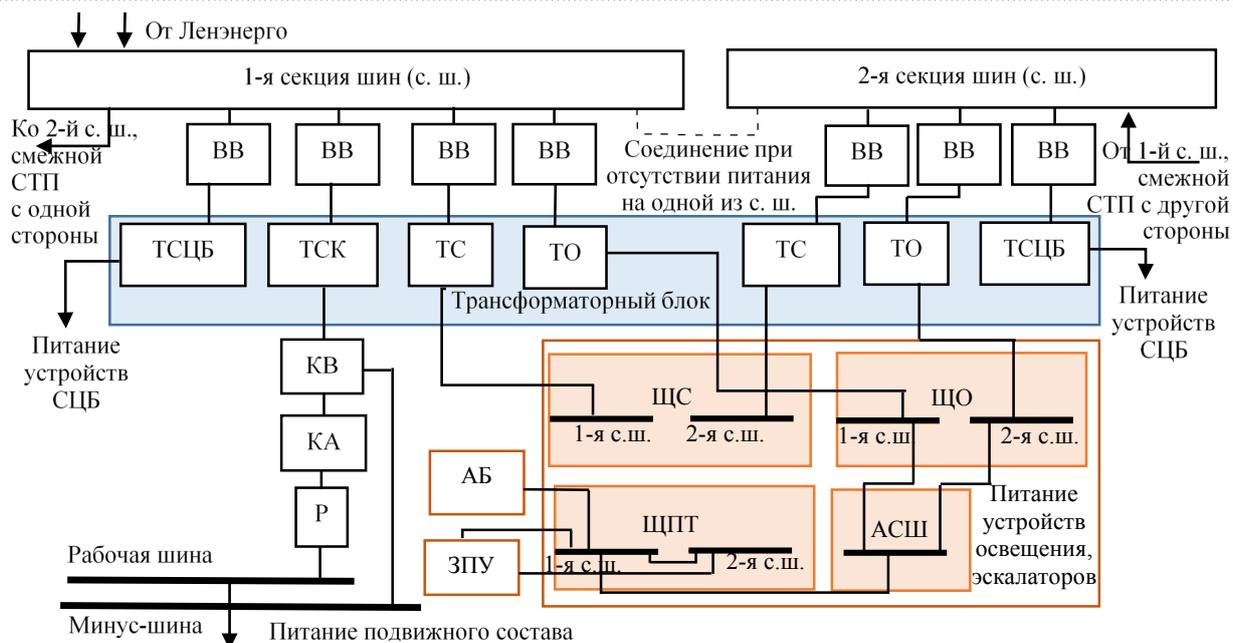


Рис. 1. Обобщенная схема СТП
Fig. 1. Generalized substation scheme

В связи с этим существующие подсистемы контроля – комплексная автоматизированная система диспетчерского управления работой линии метрополитена, комплекс регистрации технологических нарушений, автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ), автоматизированная информационно-измерительная система технического учета энергетических ресурсов и воды – отслеживают возникающие отклонения в работе оборудования. Функционирование данных подсистем контроля обеспечивается высокими требованиями к диагностированию, передаче и обработке данных, информированию диспетчерского аппарата. Возникновение сбоев в данной цепочке ведет к получению недостоверной, неполной информации, а также к увеличению вероятности несвоевременного предоставления данных, что приводит к некачественному, несвоевременному принятию решения. Поэтому важную роль играет качество процесса функционирования подсистем контроля для принятия решения с высоким показателем адекватности, оптимальности, оперативности, управляемости, устойчивости, бесперебойности.

Внедренные на метрополитене системы позволяют в существенной мере проводить последовательность передачи информации, вести статистику по параметрам оборудования, а проведенный анализ функционирующих подсистем контроля показывает большой охват оборудования для контроля, наличие параллельной работы под-

систем предыдущего и нового поколений, длительный период внедрения подсистем контроля, ограниченный вычислительный ресурс подсистем по сравнению с возможностями измерительных приборов. Поэтому необходимо расширение функциональных возможностей подсистем контроля.

Построение полумарковской модели. Перечень состояний и их взаимодействия. Предлагается использовать полумарковский анализ с применением теории графов и метода производящих функций, который позволит выявить вклад каждого состояния и перехода в общий процесс функционирования и восстановления в части времени, вероятностей переходов и ошибок. Построение модели основывается на рассмотренной обобщенной графоаналитической модели [21]. В результате анализа опыта эксплуатации и статистики инцидентов на оборудовании системы электропитания тяги поездов сформирован следующий перечень состояний, в достаточной степени отражающий процесс функционирования:

S_1 – исправное работоспособное состояние сети электропитания;

S_2 – состояние проведения мониторинга, контроля, измерений;

S_3 – состояние параметрического отказа (отказы со стороны энергосистемы города, определяемые отклонениями по частоте, по напряжению, перенапряжениями; несинусоидальность напряжения, несимметрия напряжений);

S_4 – состояние нарушения условий эксплуатации (отказы, связанные с неправильным поряд-

ком сбора схемы питания, неправильным подбором элемента сети, некачественным монтажом или установкой, нарушение требований инструкций, технологического процесса);

S_5 – состояние неисправности оборудования и коммутационных аппаратов (отказ, который определяется старением и износом оборудования, неисправностью, вызванной внешними воздействиями (параметрическим отказом, вибрациями), – например, отказ диодов в шкафу кремниевого выпрямителя, залипание контактов, отсутствие давления между контактами для соединения, оплавлением контактов, однократное отсутствие контакта);

S_6 – состояние неисправности кабельной продукции (разрушение изоляции, пробой изоляции, повреждения кабеля, все виды замыканий);

S_{7-1} – состояние этапа восстановления посредством фиксации и передачи информации системой диспетчера;

S_{7-2} – состояние восстановления посредством удаленных переключений диспетчером;

S_{7-3} – состояние восстановления посредством выполнения технических работ работником;

S_{2-1} – состояние контрольной проверки (измерений) системой после восстановления;

S_{2-2} – состояние диагностики работником с помощью переносных средств изменений;

S_8 – состояние исправного работоспособного состояния после восстановления.

Построение переходов обусловлено следующим. В процессе функционирования системы электроснабжения и работы ее в исключительно исправном работоспособном состоянии мониторинг проводится на постоянной основе с некоторой периодичностью, например в системе АИИС КУЭ, что отражено в графе (рис. 2) как двусторонний переход S_1-S_2 и S_2-S_1 . В то же время, подсистемы контроля могут отследить указанные переходы в отказ в период проведения сбора информации, однако неисправность будет зафиксирована только для параметрического отказа S_2-S_3 и для неисправности оборудования S_2-S_5 . Эксплуатационная неисправность в случае внезапных отказов может быть представлена как отражение на круге диспетчера несобранной схемой с возникновением отклонений по параметрам $S_4-S_3-S_{7-1}-S_{7-2}$, а также может привести к неисправности кабельной продукции при некаче-

ственном присоединении S_4-S_6 . Параметрические отказы своим проявлением влияют на работу оборудования S_3-S_5 и кабельной продукции S_3-S_6 . Неисправности оборудования и кабельной продукции будут сопровождаться параметрическим отказом, о котором подсистема контроля оповестит диспетчера ($S_5-S_3-S_{7-1}$ и $S_6-S_3-S_{7-1}$) при переходе в область восстановления.

Процесс восстановления разделен на три этапа. Подсистема контроля представляет собой этап сбора информации о проводимом периодическом мониторинге S_2-S_{7-1} , фиксации параметрических отказов S_3-S_{7-1} и информирования диспетчера $S_{7-1}-S_{7-2}$. Диспетчер – ответственное звено в принятии решения по восстановлению, т. е. он самостоятельно удаленно переключает оборудование, например при увеличенной нагрузке на уже работающих кремниевых выпрямительных агрегатах (КВА) в схему вводится еще один КВА ($S_{7-2}-S_{2-1}-S_8$) либо после перевода участка сети на резерв подготавливается приказ на проведение работ восстановительной бригадой ($S_{7-2}-S_{7-3}$). Завершение оперативных переключений и выполнение работ восстановительной бригадой должно быть подкреплено контрольной проверкой, которая обеспечивает подтверждение корректных параметров восстановленного оборудования с помощью удаленного контроля S_{2-1} и переносными средствами диагностики S_{2-2} . Под проверкой системы S_{2-1} подразумевается подтверждение системы контроля о таких операциях, как полная сборка схемы сети электроснабжения, информирование диспетчера и фиксация параметров вновь введенного в схему оборудования в режиме реального времени. Диагностика S_{2-2} работником представляет собой снятие параметров непосредственно после физической установки соединений. Такая успешная двойная контрольная проверка переводит систему электроснабжения в исправное работоспособное состояние после восстановления S_8 . Также в модель введено допущение, что состояние S_8 может оказаться не конечным, и собранная схема питания через небольшой промежуток времени перейдет в состояние обнаруженного отказа (повторного или нового).

Построение зависимостей по методу производящих функций. Каждому переходу из состояния в состояние соответствует переходная (производящая) функция вида

$$F(x) = \sum_{i=1}^n p_i x^a,$$

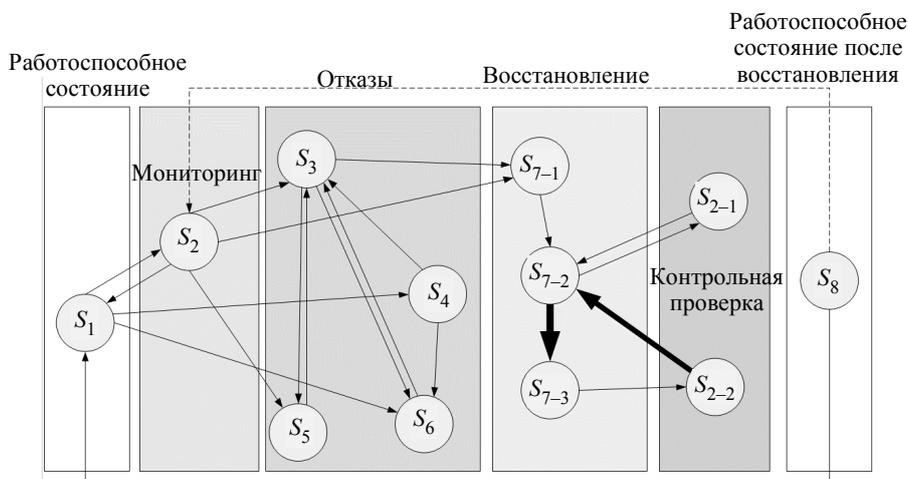


Рис. 2. Граф процесса функционирования системы электроснабжения и подсистемы мониторинга
 Fig. 2. Graph of the process of functioning of the power supply system and the monitoring subsystem

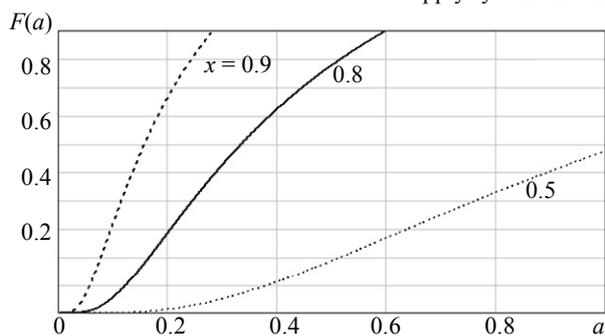


Рис. 3. Зависимость вероятности восстановления $F(a)$ от времени при изменении объема средств диагностирования и $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002$
 Fig. 3. The dependence of the probability of recovery on time with a change in the volume of diagnostic tools and $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002$

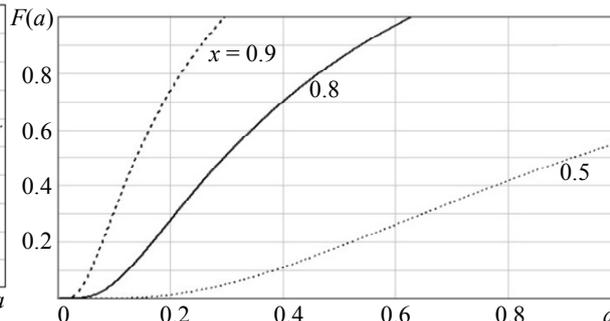


Рис. 4. Зависимость вероятности восстановления $F(a)$ от времени при изменении объема средств диагностирования и $p_{o1} = 0.05, p_{o2} = 0.05$
 Fig. 4. The dependence of the probability of recovery on time with a change in the volume of diagnostic tools and $p_{o1} = 0.05, p_{o2} = 0.05$

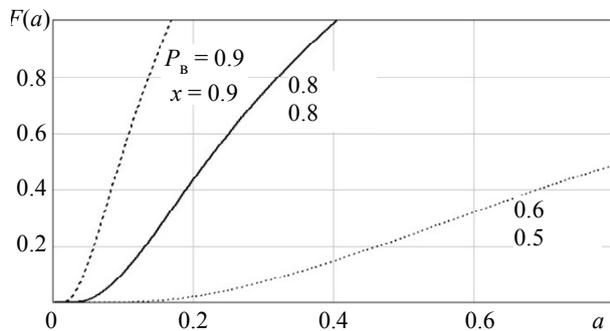


Рис. 5. Зависимости вероятности восстановления $F(a)$ от времени при изменении объема средств диагностирования, вероятности восстановления и $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002$
 Fig. 5. Dependences of the probability of recovery on time with a change in the volume of diagnostic tools, the probability of recovery and $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002$

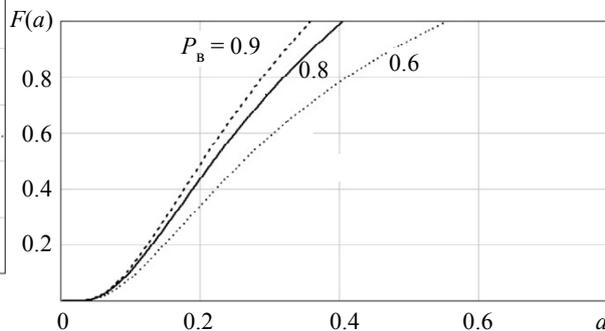


Рис. 6. Зависимости вероятности восстановления $F(a)$ от времени при изменении вероятности этапа восстановления, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, x = 0.8$
 Fig. 6. Dependences of the recovery probability on time with a change in the recovery probability, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, x = 0.8$

где x – параметр, определяющий объем средств диагностирования ($x = [0, 1]$); $a = t$ – безразмерная величина, характеризующая количество единичных отрезков времени; p_i – вероятность i -го перехода.

Производящая функция системы имеет вид

$$F_{\{S_1-S_8\}}(x) = \frac{[(f_1^P + \dots + f_n^P) \times (1 - f_1^K) \times \dots \times (1 - f_m^K)]}{(1 - f_1^K) \times \dots \times (1 - f_m^K)},$$

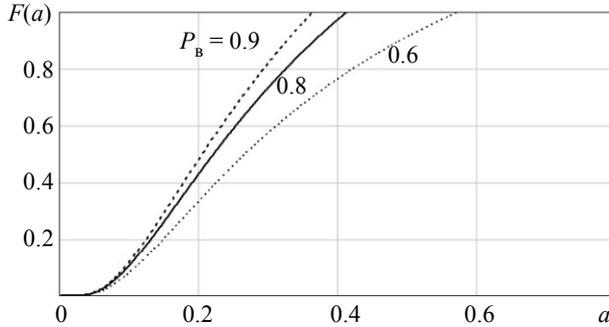


Рис. 7. Зависимости вероятности восстановления от времени при изменении вероятности этапа восстановления, $p_{o1} = 0.05, p_{o2} = 0.05, x = 0.8$
Fig. 7. Dependences of the recovery probability on time with a change in the recovery probability, $p_{o1} = 0.05, p_{o2} = 0.05, x = 0.8$

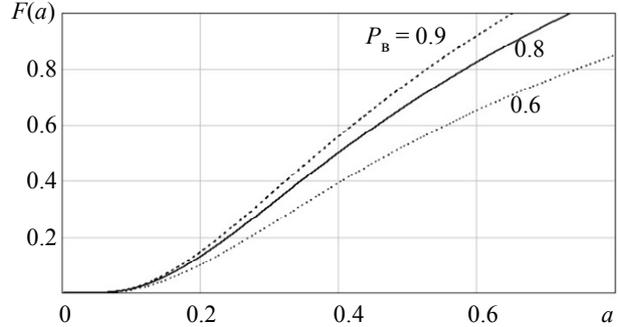


Рис. 8. Зависимости вероятности восстановления от времени при изменении вероятности восстановления, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, x = 0.6$
Fig. 8. Dependences of the recovery probability on time with a change in the recovery probability, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, x = 0.6$

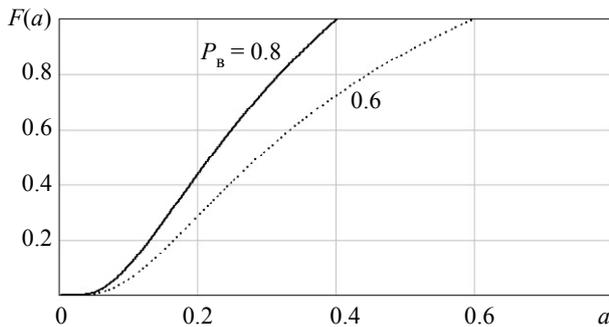


Рис. 9. Зависимости вероятности восстановления от времени при изменении вероятности этапа восстановления, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, x = 0.8$
Fig. 9. Dependences of the recovery probability on time with a change in the recovery probability, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, x = 0.8$

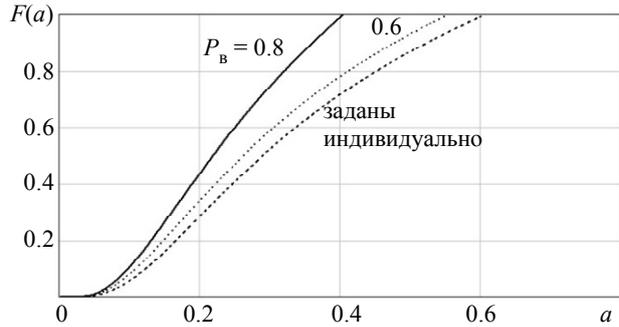


Рис. 10. Зависимости вероятности восстановления от времени при изменении вероятности этапа восстановления, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, x = 0.8$
Fig. 10. Dependences of the probability of recovery on time with a change in the probability of recovery $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, x = 0.8$

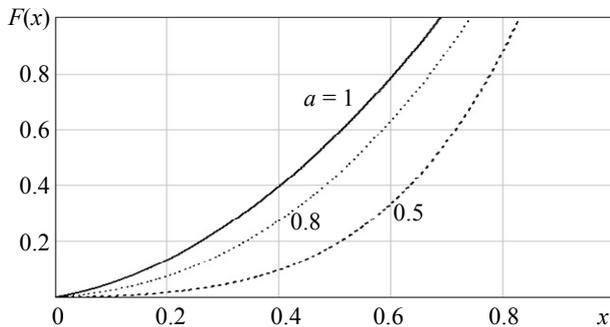


Рис. 11. Зависимости вероятности восстановления $F(x)$ от объема средств диагностирования, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002$, вероятности этапа восстановления заданы индивидуально
Fig. 11. Dependences of the probability of recovery on the amount of diagnostic tools, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002$, the probabilities are set individually

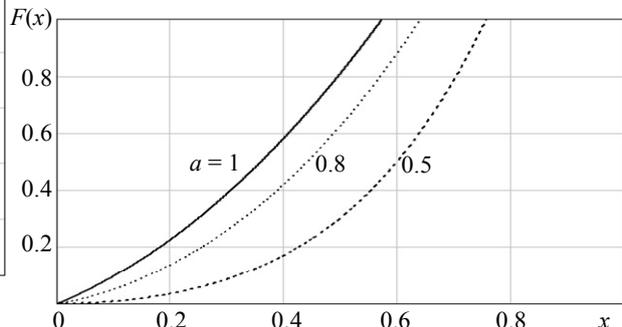


Рис. 12. Зависимости вероятности восстановления $F(x)$ от объема средств диагностирования, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, P_B = 0.8$
Fig. 12. Dependences of the probability of recovery on the amount of diagnostic tools, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002, P_B = 0.8$

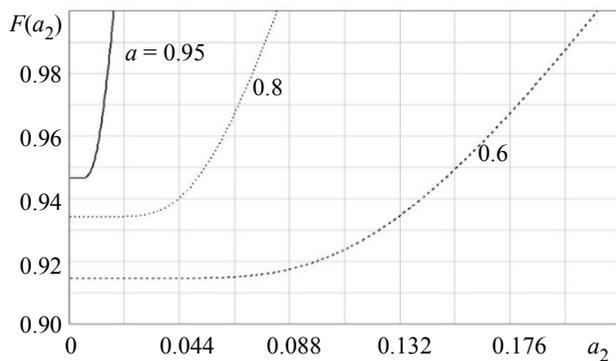


Рис. 13. Зависимости вероятности восстановления от времени мониторинга при изменении объема средств диагностирования, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002$

Fig. 13. Dependences of the probability of recovery on the monitoring time when the volume of diagnostic tools changes, $p_{o1} = 0.001, p_{o2} = 0.002$

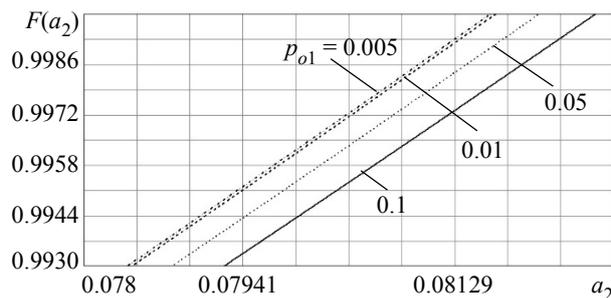


Рис. 14. Зависимости вероятности восстановления от времени мониторинга при изменении вероятности ошибки первого рода p_{o1}

Fig. 14. Dependences of the recovery probability on the monitoring time when the probability of an error of the first kind changes p_{o1}

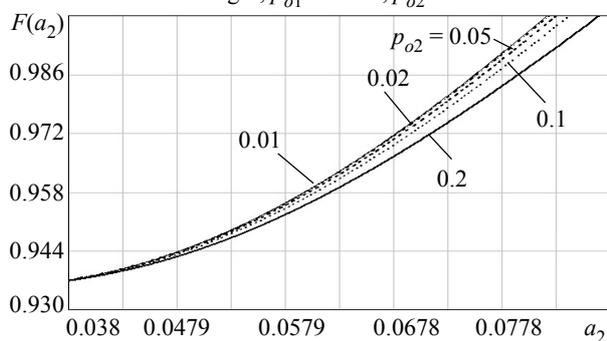


Рис. 15. Зависимости вероятности восстановления от времени мониторинга при изменении вероятности ошибки второго рода p_{o2}

Fig. 15. Dependences of the recovery probability on the monitoring time with a change in the probability of an error of the second kind p_{o2}

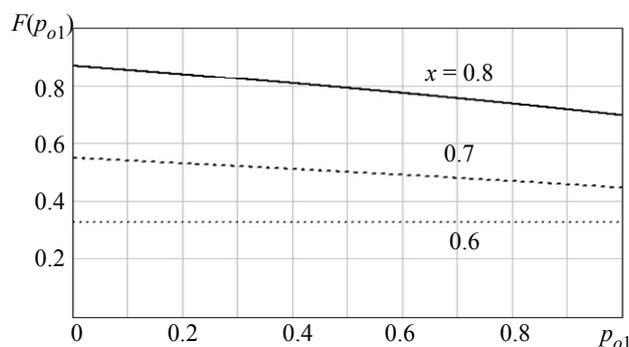


Рис. 16. Зависимости вероятности восстановления от вероятности ошибки первого рода при $p_{o2} = 0.02$

Fig. 16. Dependences of the recovery probability on the probability of an error of the first kind at $p_{o2} = 0.02$

где f_n^p, f_m^K – производящие функции n -го пути и m -го контура обобщенного графа.

По проведенному расчету производящих функций контуров и путей графа получены зависимости, представленные на рис. 3–16.

Выводы. Построенные зависимости показывают следующее:

1. Десятые доли объема средств диагностирования в разы изменяют количество времени на достижение требуемого восстановления.

2. Индивидуально заданные вероятности состояний этапа восстановления определяют в целом меньший результат достижения восстановления по отношению к обобщенной графоаналитической модели.

3. Ошибка первого рода (определение исправного состояния как отказа) увеличивает время мониторинга на несколько секунд, что может отразиться на несвоевременности передачи данных,

а также увеличивает вероятность пропуска фиксации изменения контролируемого параметра.

4. Ошибка второго рода (определение неисправного состояния как исправного) увеличивает время мониторинга на десяток секунд, что отразится не только на потере времени на поиск неисправности, но и на возникновении новых отказов, негативном влиянии на работу смежного оборудования, снижению срока эксплуатации.

Заключение. Разработанная полумарковская модель процессов функционирования и восстановления позволяет представить структуру работы подсистемы мониторинга и управления и самой системы электроснабжения тяги поездов метрополитена в одном моделировании, а также дает возможность задания корректировки требований по времени восстановления оборудования или системы в целом, по параметрам метрологического ресурса, по объему средств диагностирования как по отдельности, так и друг относительно друга в зависимости от поставленных задач на модернизацию.

Список литературы

1. Emmanuel M., Seah W. K. G., Rayudu R. Communication architecture for smart grid applications // IEEE Symp. on Comp. and Communications (ISCC). 2018. P. 00746–00751. doi: 10.1109/ISCC.2018.8538472. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8538472> (дата обращения 25.12.2022).
2. Internet of things-aided smart grid: technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions / Y. Saleem, N. Crespi, M. H. Rehmani, R. Copeland // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 62962–63003. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913984.
3. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
4. Коробченко Д. А., Котов С. В. Опыт применения Smart Grid в России и за рубежом. Энергетическая безопасность // Сб. науч. ст. III Междунар. конгресса: в 2 т. Изд-во: Юго-Западный гос. ун-т (Курск), 2020. Т. 1. С. 179–192.
5. Слесарчук А. А., Шавловский С. В. Интеллектуальные энергетические системы городов с активно-адаптивной сетью (Smart Grid) // Релейная защита и автоматизация. 2018. № 3 (32). С. 56–62.
6. Шестернева А. М., Титаренко О. Н., Малюк Е. Г. Энергосберегающие решения в распределительных электрических сетях с применением интеллектуальных сетей Smart Grid // Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6, № 4. С. 103–111.
7. Цифровые подстанции. Опыт реализации / В. Н. Курьянов, Л. Р. Куш, Н. Р. Горбунова, В. В. Цыпик // Наука, образование и культура. 2018. № 3 (27). С. 9–12.
8. Слышалов В. К., Чекан Г. В. Расчет показателей надежности распределительных электрических сетей при наличии автоматического включения резерва // Вестн. ИГЭУ. 2010. № 2. С. 1–4.
9. Грачева Е. И., Ильясов И. И., Алимова А. Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электропитания промышленных предприятий // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 3–4. С. 62–71. doi: 10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-62-71.
10. Pronevich O. B., Shved V. E. Algorithm of calculation and forecasting of functional safety indicators of railway power supply systems // Dependability. 2018. Vol. 18, no. 3. P. 46–55. doi: 10.21683/1729-2646-2018-18-3-46-55.
11. Norman B. The applicability of Markov analysis. Methods to reliability, maintainability, and safety // Selected Topics in Assurance Related Technologies (START). 2003. Vol. 10, no. 2. P. 1–8.
12. Викторова В. С., Свердлик Ю. М., Степанянц А. С. Анализ надежности систем сложной структуры на многоуровневых моделях // Автоматика и телемеханика. 2010. № 7. С. 143–148.
13. Слышалов В. К., Чекан Г. В. Анализ методов, основанных на теории графов для определения показателей надежности схем ЭЭС // Вестн. ИГЭУ. 2010. № 4. С. 1–3.
14. Ахмедов Г. М., Асланов Д. Г. Применение полумарковских моделей восстанавливаемых систем для расчета основных показателей надежности электровозов переменного тока // Universum: Техн. науки. 2018. № 3(48). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5628> (дата обращения 25.12.2022).
15. Обжерин Ю. Е., Сидоров С. М., Никитин М. М. О применении суперпозиции полумарковских процессов к моделированию систем энергетики // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: в 2 кн. / Отв. ред. Н. И. Воропай, 2019. С. 269–274.
16. Обжерин Ю. Е., Сидоров С. М., Никитин М. М. Применение суперпозиции независимых полумарковских процессов и скрытых марковских моделей к моделированию систем энергетики // Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 3. С. 69–80. doi: 10.31857/S0002331020030048.
17. Обжерин Ю. Е. Полумарковские и скрытые марковские и полумарковские модели систем энергетики // Изв. РАН. Энергетика. 2019. № 5. С. 26–32. doi: 10.1134/S0002331019050091.
18. Использование метода путей при моделировании процесса функционирования технической системы с отключением рабочего элемента на период проведения контроля / М. В. Замоленов, В. Я. Копп, С. Н. Федоренко, И. М. Замоленов // Изв. ТулГУ. Техн. науки. 2021. № 4. С. 1–7. doi: 10.24412/2071-6168-2021-4-63-69.
19. Обжерин Ю. Е., Сидоров С. М., Никитин М. М. Анализ надежности и фазовое укрупнение систем с поэлементными накопителями // Изв. РАН. Энергетика. 2019. № 6. С. 66–77. doi: 10.1134/S0002331019050108.
20. Зеленцов Б. П., Трофимов А. С. Модель функционирования системы релейной защиты при регулярных проверках // Вестн. СибГУТИ. 2017. № 4(40). С. 56–66.
21. Давыдова А. В. Аналитическая модель процесса функционирования сети электроснабжения метрополитена на основе вероятностно-временного графа с применением метода производящих функций // Мат. XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Наука и образование транспорту» / СамГУПС. Самара, 2021. Т. 2. С. 109–114.

Информация об авторах

Давыдова Анастасия Валентиновна – аспирант кафедры «Электрическая тяга» Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031, Россия.
E-mail: av-davydova-pgups@yandex.ru

Канаев Андрей Константинович – д-р техн. наук, профессор кафедр «Электрическая связь», «Электрическая тяга» Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031, Россия.

E-mail: vvlov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6800-7124>

References

- Emmanuel M., Seah W. K. G., Rayudu R. Communication architecture for smart grid applications // IEEE Symp. on Comp. and Communications (ISCC). 2018. P. 00746–00751. doi: 10.1109/ISCC.2018.8538472. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8538472> (data obrashheniya 25.12.2022).
- Internet of things-aided smart grid: technologies, architectures, applications, prototypes, and future research directions / Y. Saleem, N. Crespi, M. H. Rehmani, R. Copeland // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 62962–63003. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913984.
- Kobec B. B., Volkova I. O. Innovacionnoe razvitie jelektroenergetiki na baze koncepcii Smart Grid. M.: IAC Jenergija, 2010. 208 s. (In Russ.).
- Korobchenko D. A., Kotov S. V. Opyt primeneniya Smart Grid v Rossii i za rubezhom. Jenergeticheskaja bezopasnost' // Sb. nauch. st. III Mezhdunar. kongressa: v 2 t. Izd-vo: JUgo-Zapadnyj gos. un-t (Kursk), 2020. Vol. 1. P. 179–192. (In Russ.).
- Slesarchuk A. A., SHavlovskij S. V. Intellektual'nye jenergeticheskie sistemy gorodov s aktivno-adaptivnoj set'ju (Smart Grid) // Relejnaja zashhita i avtomatizacija. 2018. № 3 (32). P. 56–62. (In Russ.).
- SHesterneva A. M., Titarenko O. N., Malyuk E. G. Jenergosberegajushhie reshenija v raspredelitel'nyh jelektricheskij setjah s primeneniem intellektual'nyh setej Smart Grid // Jenergeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2020. Vol. 6, № 4. P. 103–111. (In Russ.).
- Cifrovye podstancii. Opyt realizacii / V. N. Kur'yanov, L. R. Kushch, N. R. Gorbunova, V. V. Cypik // Nauka, obrazovanie i kul'tura. 2018. № 3 (27). P. 9–12. (In Russ.).
- Slyshalov V. K., CHekan G. V. Raschet pokazatelej nadezhnosti raspredelitel'nyh jelektricheskij setej pri nalichii avtomaticheskogo vkljuchenija rezerva // Vestn. IGEU. 2010. № 2. P. 1–4. (In Russ.).
- Gracheva E. I., Il'yasov I. I., Alimova A. N. Sravnitel'nyj analiz i issledovanie metodov rascheta poter' jelektroenergii v sistemah jelektrosnabzhenija promyslennyh predpriyatij // Izv. vuzov. Problemy jenergetiki. 2018. Vol. 20, № 3–4. P. 62–71. doi: 10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-62-71. (In Russ.).
- Pronevich O. B., Shved V. E. Algorithm of calculation and forecasting of functional safety indicators of railway power supply systems // Dependability. 2018. Vol. 18, no. 3. P. 46–55. doi: 10.21683/1729-2646-2018-18-3-46-55.
- Norman B. The applicability of Markov analysis. methods to reliability, maintainability, and safety // Selected Topics in Assurance Related Technologies (START). 2003. Vol. 10, no. 2. P. 1–8.
- Viktorova V. S., Sverdlik Ju. M., Stepanjanc A. S. Analiz nadezhnosti sistem slozhnoj struktury na mnogourovnevnyh modeljah // Avtomatika i telemekhanika. 2010. № 7. P. 143–148. (In Russ.).
- Slyshalov V. K., CHekan G. V. Analiz metodov, osnovannyh na teorii grafov dlja opredelenija pokazatelej nadezhnosti skhem EES // Vestn. IGEU. 2010. № 4. P. 1–3. (In Russ.).
- Ahmedov G. M., Aslanov D. G. Primenenie polumarkovskij modelej vosstanavlivaemyh sistem dlja rascheta osnovnyh pokazatelej nadezhnosti jelektrovozov peremennogo toka // Universum: Tekhn. nauki. 2018. № 3(48). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/5628> (data obrashheniya 25.12.2022). (In Russ.).
- Obzherin Yu. E., Sidorov S. M., Nikitin M. M. O primenenii superpozicii polumarkovskij processov k modelirovaniju system jenergetiki // Metodicheskie voprosy issledovanija nadezhnosti bolshij system jenergetiki / Otv. red. N. I. Voropai, 2019. S. 269–274.
- Obzherin Yu. E., Sidorov S. M., Nikitin M. M. Primenenie superpozicii nezavisimyj polumarkovskij processov i skrytyh markovskij modelej k modelirovaniju sistem energetiki // Izv. RAN. Jenergetika. 2020. № 3. P. 69–80. doi: 10.31857/S0002331020030048. (In Russ.).
- Obzherin Yu. E. Polumarkovskie i skrytye markovskie i polumarkovskie modeli sistem jenergetiki // Izv. RAN. Jenergetika. 2019. № 5. P. 26–32. doi: 10.1134/S0002331019050091. (In Russ.).
- Ispol'zovanie metoda putej pri modelirovanii processa funkcionirovanija tekhnicheskij sistemy s otkljucheniem rabocheho jelementa na period provedenija kontrolja / M. V. Zamorjonov, V. Ja. Kopp, S. N. Fedorenko, I. M. Zamorjonov // Izv. TulGU. Tekhn. nauki. 2021. № 4. P. 1–7. doi: 10.24412/2071-6168-2021-4-63-69. (In Russ.).
- Obzherin Yu. E., Sidorov S. M., Nikitin M. M. Analiz nadezhnosti i fazovoe ukрупnenie sistem s pojelementnymi nakopiteljami // Izv. RAN. Jenergetika. 2019. № 6. P. 66–77. doi: 10.1134/S0002331019050108. (In Russ.).
- Zelencov B. P., Trofimov A. S. Model' funkcionirovanija sistemy relejnoj zashhity pri reguljarnyj proverkah // Vestn. SibGUTI. 2017. № 4(40). P. 56–66. (In Russ.).
- Davydova A. V. Analiticheskaja model' processa funkcionirovanija seti jelektrosnabzhenija metropolitena na osnove verojatnostno-vremennogo grafa s primeneniem metoda proizvodjashhij funkcij // Mat. XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Nauka i obrazovanie transportu» / SamGUPS. Samara, 2021. Vol. 2. P. 109–114. (In Russ.).

Information about the authors

Anastasiya V. Davydova – postgraduate student of the Department of Electric Traction of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, Moskovsky pr., 9, Saint Petersburg, 190031, Russia.

E-mail: av-davydova-pgups@yandex.ru

Andrew K. Kanaev – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Departments of Electrical Communication, Electric Traction of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, Moskovsky pr., 9, Saint Petersburg, 190031, Russia.

E-mail: vvlov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6800-7124>

Статья поступила в редакцию 17.02.2023; принята к публикации после рецензирования 23.02.2023; опубликована онлайн 25.04.2023.

Submitted 17.02.2023; accepted 23.02.2023; published online 25.04.2023.
