

УДК 004.94

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.32.1.007](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.007)

Моделирование динамики серверной нагрузки стохастическими сетями Петри с приоритетами (на примере системы видеоконференцсвязи)

В.В. Печенкин, А.Т.Х. Аль-Хазраджи, С.С. Гельбух

ВГОБУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Саратов, Российская Федерация

Резюме. Использование современных форм обучения в высших учебных заведениях определяет повышенную нагрузку на серверы учреждений высшего образования. Особенно это актуально для реализованных на базе университетской информационной инфраструктуры систем видеоконференцсвязи. Для повышения надежности и устойчивости этих систем необходим анализ распределения нагрузки на систему в целом и отдельные ее компоненты в соответствии с имеющимся расписанием занятий. Основной задачей статьи является предсказание пиков нагрузки, которые определяются расписанием, но зависят и от ряда случайных факторов. В работе предлагается динамическая модель, имитирующая формирование нагрузки на серверы системы видеоконференцсвязи в зависимости от имеющегося расписания занятий с учетом случайных факторов. Решение задачи моделирования и прогнозирования поведения динамической системы основано на использовании стохастического аппарата сетей Петри с приоритетами. В качестве дополнительного механизма обеспечения адекватности модели определяются временные интервалы переходов сети Петри, внутри которых они могут быть активными, что позволяет привязать функционирование всей сети к реальным временным интервалам в расписании занятий. Критерием адекватности модели является соответствие распределения прогнозируемой нагрузки на сервера по результатам вычислительного эксперимента реальным данным, полученным в ходе эксплуатации системы видеоконференцсвязи.

Ключевые слова: система организации видеоконференций, сеть Петри, серверная нагрузка, стохастическое моделирование, случайные факторы

Для цитирования: Печенкин В.В., Аль-Хазраджи А.Т.Х., Гельбух С.С. Моделирование динамики серверной нагрузки стохастическими сетями Петри с приоритетами (на примере системы видеоконференцсвязи). *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=886> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.007

Modeling the dynamics of the servers load by stochastic Petri nets with priorities (on the example of a video conferencing system)

V.V. Pechenkin, A.T.H. Al-Khazraji, S.S. Gelbukh

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Saratov, Russian Federation*

Abstract: Modern forms of education in higher educational institutions determine the increased load on the servers of higher educational institutions. This is especially true for video conferencing systems implemented based on the University's information infrastructure. To improve the reliability and

stability of these systems, it is necessary to analyze the load distribution on the system as a whole and its components following the existing schedule. The main task of the article is to predict the load peaks, which are determined by the graph, but also depend on several random factors. The article proposes a dynamic model that simulates the formation of the load on servers of the video conferencing system depending on the available schedule of classes, taking into account random factors. The solution to the problem of modeling and predicting the behavior of a dynamic system is based on the use of the stochastic apparatus of Petri nets with priorities. As an additional mechanism for ensuring the adequacy of the model, the time intervals of Petri net transitions are determined, within which they can be active. It allows linking the functioning of the entire network with real-time intervals in the class schedule. The adequacy of the proposed model is proved by the correspondence of the predicted load servers distribution based on the results of a computational experiment to real video conferencing system data.

Keywords: video conferencing system, Petri net, server load, stochastic modeling, random factors

For citation: Pechenkin V.V., Al-Khazraji A.T.H., Gelbuh S.S. Modeling the dynamics of the servers load by stochastic Petri nets with priorities (on the example of a video conferencing system). *Modeling, optimization, and information technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=886> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.007 (In Russ). (In Russ).

Введение

Использование видеоконференций в системе дистантного обучения стало широко распространённой практикой, особенно в условиях существенного изменения существа учебного процесса во второй половине 2020 года. Учебные заведения системы высшего образования Российской Федерации и большинства стран мира перешли на массовое использование систем видеоконференцсвязи в учебном процессе. Такие решения как Skype, ZOOM, Google Hangout зарекомендовали себя как стабильные системы с широким набором возможностей. В этих системах имеются бесплатные варианты использования, имеющие различные ограничения на число участников конференции, время сеанса, возможно записи видео и некоторые другие. Кроме закрытых проприетарных решений имеются и бесплатные системы с открытым кодом, которые также предлагают исчерпывающий набор функциональности, но требуют развёртывания необходимой информационной инфраструктуры в учебном заведении, администрирования системы, анализа трафика. К таким решениям относится система видеоконференцсвязи BigBlueButton (BBB), которая используется в некоторых высших учебных заведениях для организации процесса обучения. Очевидно, что сам процесс регламентируется имеющимся расписанием занятий. Последнее соотносится с количественными показателями контингента и интервалами времени, внутри которых проводятся занятия. Сам процесс имеет в качестве параметров различные характеристики, определяемые сдвигами во времени при начале и окончании конкретного занятия, статистически определяемыми показателями посещаемости занятий, использованием видео при проведении конференции только преподавателем или студентами, входящими в учебные группы.

Вопросам исследования образовательного процесса посвящено достаточно большое количество публикаций в зарубежной и российской научной литературе. Основной интерес исследователей обращен к проблематике построения моделей процесса обучения, выбору наиболее эффективных образовательных форм [1, 2]. Сам образовательный процесс связывается с реализацией учебной программы, под которой понимаются учебные планы, схемы преподавания, составление расписаний [3]. Особый

интерес исследователей привлечён к вопросам онлайн образования, которое начинает широко применяться в последнее время на разных уровнях образования [4].

Сети Петри считаются устоявшимся математическим формализмом для моделирования и анализа распределенных систем. Такой подход позволяет учитывать большое количество деталей функционирования анализируемых процессов. Эти процессы могут варьироваться от технических систем до бизнес-систем или социальных взаимодействий. [5, 6, 7, 8]. В последнее время было предложено много расширений для того, чтобы более непосредственно отразить специфическое, возможно, достаточно сложное поведение. Эти расширения включают в себя сети Петри-ингибитора [9] и сети с приоритетами для переходов [10, 11].

В настоящей статье предложена модель, которая соответствует расписанию учебного процесса и описан комплекс методик, позволяющих решить широкий круг вопросов планирования и администрирования нагрузки на серверную часть системы видеоконференцсвязи. Используемая формализация отвечает за стохастическое моделирование управляемого процесса. Для его реализации используется аппарат сетей Петри, позволяющий анализировать параллельные процессы в конкурентном режиме, максимально приближенном к реальным условиям динамически меняющейся ситуации [12]. Этот инструмент также традиционно используется для анализа транспортных систем, выполняющих задачи по обработке грузов [13, 14, 15]. Для решения задачи анализа серверной нагрузки используется динамическая сетевая модель, основанная на предложенной ниже формализации.

В предлагаемой статье рассматривается решение задачи моделирования трафика серверной части системы видеоконференции, которая используется в рамках учебного процесса в форме дистантного обучения. Предлагается математическая модель, связанная с расписанием учебного процесса, учитывающая элементы случайности. Результаты моделирования сравниваются с данными серверного трафика реальной системы, реализованной на базе системы видеоконференцсвязи ВВВ.

Постановка задачи

Структура моделируемой системы представлена на Рисунке 1. В качестве основных подсистем рассматриваются сервера Greenlight 2.00, получающий запросы пользователей и сервер ВВВ, который осуществляет балансирование нагрузки на серверы, обрабатывающие эти запросы. Эти серверные подсистемы изображены как отдельные компоненты, но могут быть реализованы в рамках одного физического сервера.

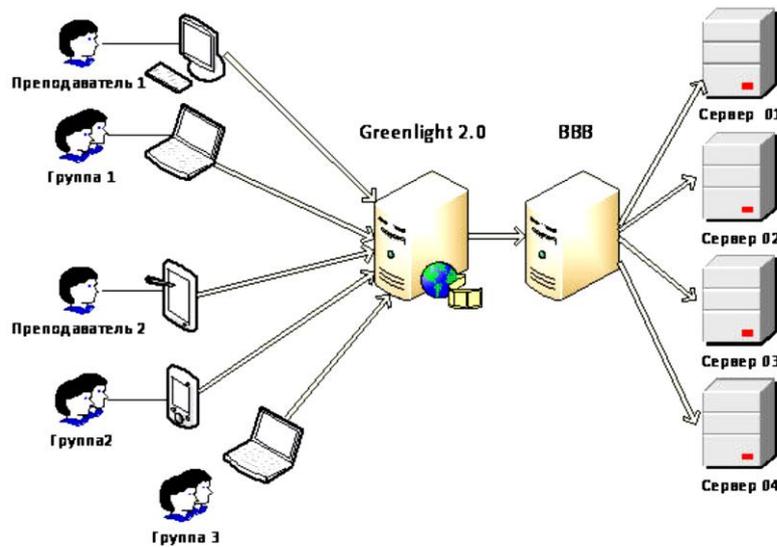


Рисунок 1 – Структура системы видеоконференцсвязи

Figure 1 – The structure of the video conferencing system

Сервер BBB балансирует нагрузку, используя в качестве критерия для принятия решения число открытых в текущий момент конференций (комнат), обрабатываемых конкретным сервером (Сервер 01 – Сервер 04). Количество последних может варьироваться в зависимости от нагрузки на всю систему.

Далее предлагается формальная модель в виде сети Петри с приоритетами, которая позволяет соотнести имеющееся расписание занятий с динамическим изменяющейся нагрузкой на серверную подсистему. Для формулировки формальной постановки задачи и её решения необходимы обозначения, представленные далее.

Для построения модели учебного процесса используется сеть Петри с приоритетами, для переходов которой определены временные интервалы времени жизни. То есть функционирование сети Петри соотносится с определённым периодом временной шкалы, внутри которой определяются интервалы активности (возможности срабатывания) переходов. Временная сетка учебного процесса представляется серией временных интервалов, для каждого из которых строится фрагмент сети Петри, описывающий запросы к серверной части на получение информации.

Формально сеть Петри с приоритетами определяется как шестёрка объектов в виде:

$$PN = (P, T, F, m_0, w, \rho), \quad (1)$$

где

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ конечное множество мест;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ конечное множество переходов;

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ конечное множество дуг между местами и переходами;

$m_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ некоторая начальная разметка сети Петри.

$w : F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ функция взвешивания дуг;

$\rho : T \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ функция, определяющая приоритеты переходов;

Выполняются дополнительные условия:

$$P \cap T = \emptyset;$$

$$P \neq \emptyset;$$

$$T \neq \emptyset.$$

Места p_i при визуализации сети Петри представляются окружностями, переходы t_i - прямоугольниками, а отношение F - направленными дугами. Места могут нести фишки, которые изображают внутри места или просто обозначают их количество натуральным числом рядом с местом. Начальная разметка в сети Петри – это функция m_0 , сопоставляющая каждому месту какое-либо натуральное число (возможно, нуль). Текущая разметка m определяет количество размещенных в данный момент на каждом месте $p \in P$ $m(p)$ фишек. Для перехода $t \in T$ дуга (x, t) называется *входной дугой*, а дуга (t, x) - *выходной дугой*.

Место $p \in P$ с дугой (p, t) к переходу $t \in T$ называется входным местом для t , а место p с дугой (t, p) от перехода t называется выходным местом. Переход $t \in T$ доступен для срабатывания в разметке m , если

$$\forall p \in P \quad m(p) \geq F(p, t) \quad (2)$$

Переход без входных мест называется источником, а переход без выходных мест называется стоком. Источник всегда может сработать, то есть является живым на протяжении всего функционирования сети.

При срабатывании перехода t из каждого входного места p удаляется $w(p, t)$ фишек и добавляется $w(t, p)$ фишек на каждое выходное место p для t . Срабатывание перехода t приводит к изменению маркировки сети, преобразованию её в новую маркировку m' (это изменение обозначается $m \xrightarrow{t} m'$), так, что

$$\forall p \in P \quad m'(p) = m(p) - w(p, t) + w(t, p) \quad (3)$$

в данном случае мы говорим, что маркировка m' доступна непосредственно из маркировки m . Маркировка m называется мертвой, если она не допускает ни одного срабатывания переходов. Выполнение сети Петри PN порождает конечную или бесконечную последовательность срабатываний переходов, которые изменяют маркировку сети

$$m_0 \rightarrow m_1 \rightarrow m_2 \rightarrow \dots \quad (4)$$

Для сети Петри с приоритетами определяется отображение ρ , которое назначает каждому переходу некоторый уровень, определяющий статистическую вероятность срабатывания перехода. Правило выбора перехода в этом случае для сети Петри PN с приоритетами определяется следующим образом. Пусть m будет маркировкой в PN , а $T' \subseteq T$ - подмножество разрешенных переходов в m (в соответствии с обычными правилами для сетей Петри). Тогда вероятность срабатывания для разрешённого перехода $t \in T'$ в m равна

$$\frac{\rho(t)}{\sum_{t_i \in T'} \rho(t_i)} \quad (5)$$

т.е. переходы с более высоким приоритетом имеют более высокую вероятность срабатывания по сравнению с переходами с более низким приоритетом.

Дополнительно для переходов сети устанавливаются временные интервалы, во время которых они могут быть доступны для срабатывания. Это обеспечивает старт выполнения фрагмента сети, который соответствует времени начала пары (два академических часа). Это требование не является обязательным при моделировании и может моделироваться с помощью создания отдельных подсетей, которые соответствуют разному времени начала занятий по расписанию. С целью формирования общей модели, которая охватывает целый день, неделю необходимо уточнение определения используемой формализации сети Петри. Для формализации этой особенности вводится дополнительное отображение

$$\tau : T \rightarrow \{Time_1, Time_2\} \quad (6)$$

где $Time_1$ и $Time_2$ – моменты времени в моделируемом отрезке, определяемые для каждого перехода такие, что $Time_1 \leq Time_2$.

Функционирование сети осуществляется в привязке к времени суток, описываемому в системе таймером с текущим временем $Time$. В рамках такого определения сети переход t становится доступным для срабатывания при выполнении для него условия (2) и дополнительного условия (7), которое требует, чтобы текущее время находилось внутри временного периода, когда переход доступен для срабатывания

$$Time_1 \leq Time \leq Time_2 \quad (7)$$

Для полного определения функционирования сети достаточно определения такого интервала только для переходов, стартующих выполнение фрагментов сети для разных пар. Далее предлагается модель процесса функционирования видеоконференции, включающую в себя аспекты реализации расписания занятий при организации учебного процесса в режиме онлайн. Фрагмент модели содержит места и переходы

$$P = \{p_i \mid i = 1, \dots, 52\} \quad (8)$$

$$T = \{t_i \mid i = 1, \dots, 51\} \quad (9)$$

которые описываются далее.

Выбранные для моделирования переходы и места отражают происходящие параллельные процессы и учитывают различные возможные состояния в зависимости от влияющих на них факторов. Полученная модель используется для проведения имитационного эксперимента по анализу характеристик процесса удаления твердых бытовых отходов. Набор мест P и переходов T представлен в Таблицах 1 и 2, соответственно.

Таблица 1 – Места сети Петри для моделирования нагрузки на серверную часть системы организации видеоконференций (* обозначает возможный номер места в сети Петри, которая изображена на Рисунке 2. Номер соответствует конкретному занятию, проходящему параллельно с остальными)

Table 1 – Petri net places for simulating the load on the video conferencing system server part of the (* denotes a possible seat number in the Petri net, which is shown in Figure 2. The number corresponds to a specific lesson that takes place in parallel with the others)

Имя места I равно 1 или 2	Интерпретация
Bell_I	Место, имеющее одну фишку, запускающую начало I-ой пары в расписании
Lect_RoomI_*	Лекции на I-ой паре расписания, создаёт конференцию (комнату) для проведения лекции
Class_RoomI_*	Семинарские занятия в одной группе на I-ой паре расписания, создаёт конференцию (комнату) для проведения семинарского занятия
Lect_I_*	Контингент участников лекции на I-ой паре расписания
Teacher_I_*	Преподаватель лекции на АГС I-ой паре расписания.
Class_I_*	Контингент участников семинарского занятия на I-ой паре расписания
BBB_Шлюз	Шлюз BBB, обрабатывает запросы и распределяет нагрузку на серверах (настройки сети Петри позволяют моделировать различную дисциплину балансирования нагрузки)
Server_I	I-й сервер обрабатывающий запросы от участников конференции

В Таблице 2 описываются переходы, которые определяют функционирование предложенной сети Петри.

Таблица 2 – Переходы сети Петри для моделирования нагрузки на серверную часть системы организации видеоконференций

Table 2 - Petri net transitions to simulate the load on the video conferencing system server part of the

Имя перехода I равно 1 или 2	Интерпретация
Start_I	Начало I-ой пары расписания. Переход срабатывает в момент времени, соответствующий началу пары
TI_*	Запрос на создание конференции (создание комнаты конференции) на I-ой паре расписания занятий
TI_*1	Запрос на обработку от студентов занятия на I-ой паре
TI_*2	Запрос на обработку от преподавателя занятия на I-ой паре
BBB_S0I	Переадресация запроса на обработку серверу с номером I

При проведении вычислительного эксперимента использовалось авторское программное обеспечение Grin (grin-software.net). Grin предоставляет унифицированный продукт теории графов со специальным расширением для моделирования сетей Петри.

С помощью этого программного инструмента можно проектировать, и моделировать выполнение сетей Петри, определяя приоритеты для вершин, временные интервалы, во время которых переход может сработать. Выполнение сети Петри осуществляется в автоматическом режиме. Информация о текущем на данный момент времени количестве фишек на местах и числе осуществлённых срабатываний записывается в специальный текстовый файл, который далее обрабатывается.

Программа позволяет редактировать сеть в интерактивном графическом режиме, назначать атрибуты мест и переходов, запускать процесс моделирования с заданными количественными ограничениями (количество переходов за один цикл моделирования). Всем переходам присваивается приоритет, который напрямую связан с вероятностью их срабатывания в процессе моделирования.

Результаты вычислительного эксперимента. Пример применения подхода к моделированию видеоконференции

На Рисунке 2 показан один из вариантов построенной сети Петри, который используется для анализа серверной нагрузки в системе видеоконференций. Было осуществлено несколько выполнений сети Петри, после которых полученные результаты усреднялись в соответствии с концепцией стохастического моделирования Монте-Карло. Предложенная модель сети Петри позволяет провести расчетный имитационный эксперимент для определения эффективного плана управления серверной подсистемой.

Левая часть сети, обозначенная маркером 1 (в левом нижнем углу), соответствует расписанию первой пары, правая часть – второй. Маркер 3 соответствует представлению серверов, нагрузка на которые балансируется серверной подсистемой ВВВ. Состав занятий первой и второй пар различаются по количеству участвующих в них студентов.

Актуальность модели сети Петри, представленной на Рисунке 3, демонстрируется посредством нескольких симуляций, выполненных для фрагмента реального расписания. Далее будет показано сходство диаграмм формирования нагрузки, полученных в результате вычислительного эксперимента в сравнении с данными реальной загрузки.

В сети, показанной на Рисунке 2, для переходов, которые стартуют начало очередной пары (Start_1 и Start_2 начинают выполнение сети для первой и второй пар, соответственно) устанавливается соответствующий расписанию период срабатывания. Далее фрагмент сети функционирует до тех пор, пока существует хотя бы один живой переход. Вторая часть сети (начало второй пары) также начинает выполняться в установленное время после срабатывания перехода Start_2.

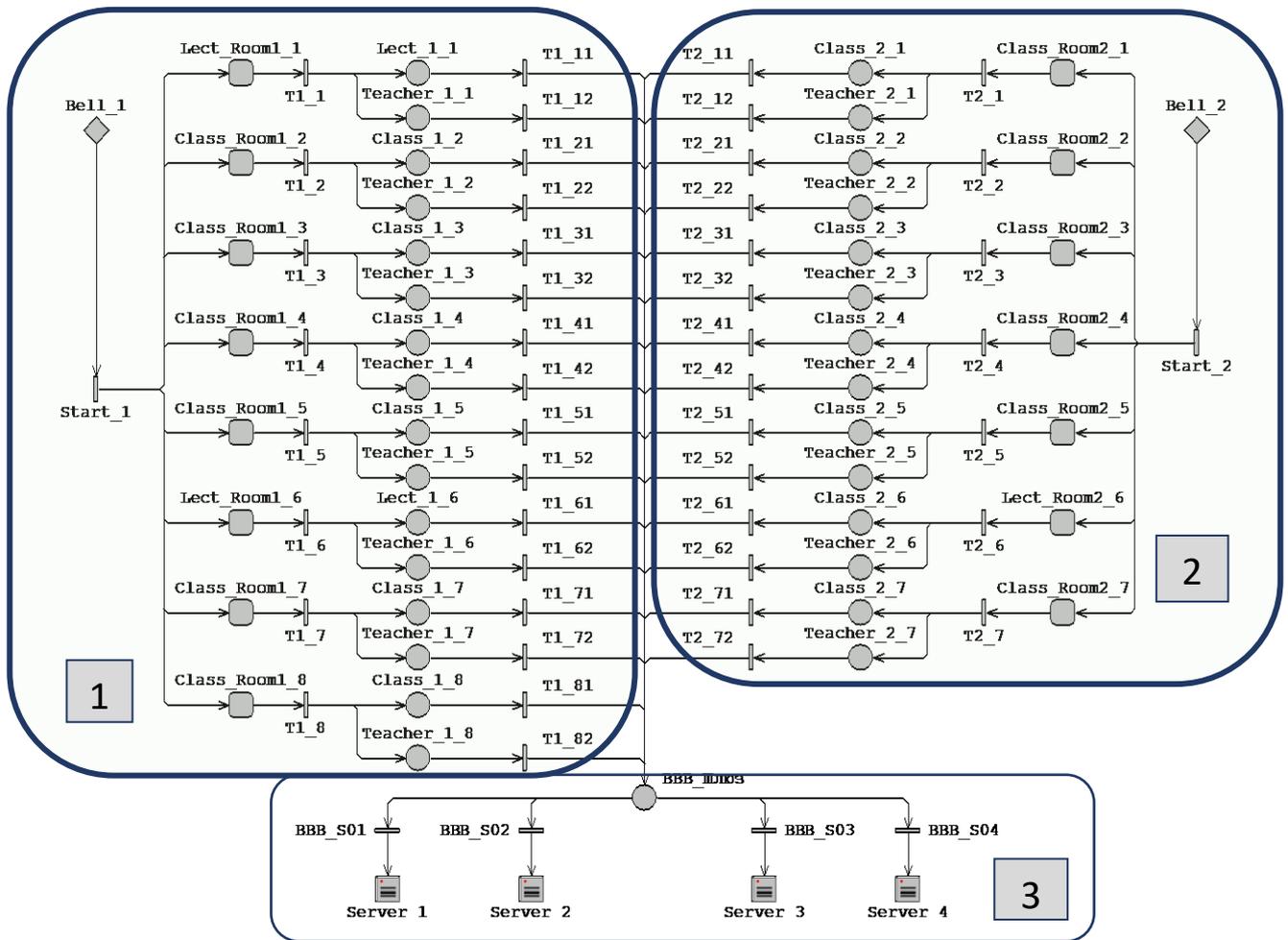


Рисунок 2 – Фрагмент сети Петри для моделирования процесса проведения занятий по расписанию

Figure 2 - A fragment of a Petri net for modeling the process of conducting classes on a schedule

Элемент случайности в модели присутствует с точки зрения времени начала занятия. Так как все места с именами Class* и Lect* в момент старта занятия получают по одной фишке, они все являются живыми и могут сработать. Так как они имеют высокий приоритет в построенной модели, с высокой вероятностью они выполняются в самом начале пары в случайном порядке и сформируют конференции. В модели может быть учтена различная посещаемость занятий, полученная из статистических данных посещаемости на момент формирования модели. Для учета различной посещаемости модель, представленная на Рисунке 2 может быть трансформирована следующим образом. Вместо одного перехода, передающего количество фишек, соответствующих контингенту учащихся, добавляется три (или больше) перехода, из которых может выполняться только один, так как для них имеется одна фишка на общем для них входном месте. Такое преобразование показано на Рисунке 3.

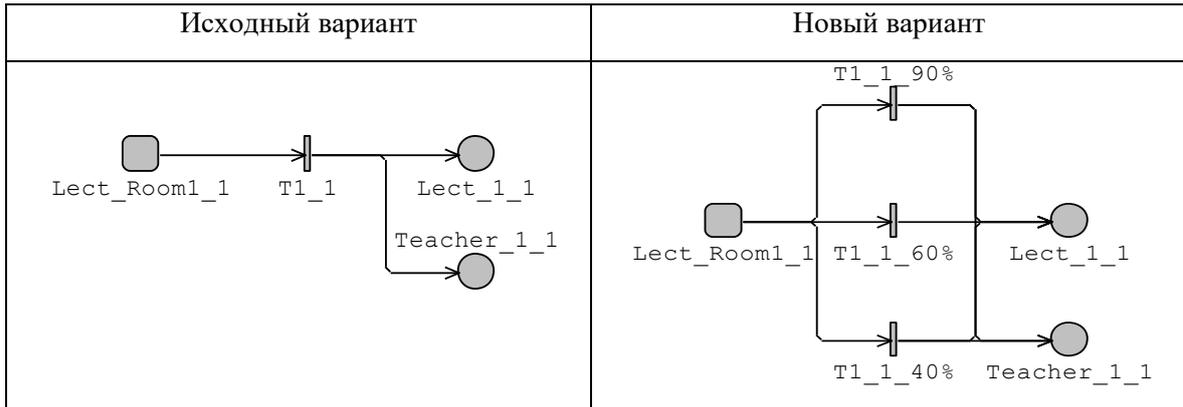


Рисунок 3 – Преобразование сети Петри для учёта отклонений в посещаемости занятий

Figure 3 - Petri net transformation to account for deviations in class attendance

При таком построении сети в зависимости от накопленной статистики можно, управляя приоритетами соответствующих переходов (40%, 60%, 90%), изменять количество фишек, отправляемых на места, соответствующие контингенту студентов (на Рисунке 3 место Lect_1_1)

Фишки перемещаются с места, представляющего преподавателя и студентов перемещаются в шлюз (ВВВ_Шлюз) и далее распределяются по серверам. Количество фишек, перемещенных на сервера в единицу времени представлено диаграммой, изображённой на Рисунке 4. Нагрузка на второй паре меньше, так как количество одновременно занимающихся групп для первой и второй пар различно. Данные получены усреднением по некоторому количеству прогонов в соответствии с методом Монте-Карло.

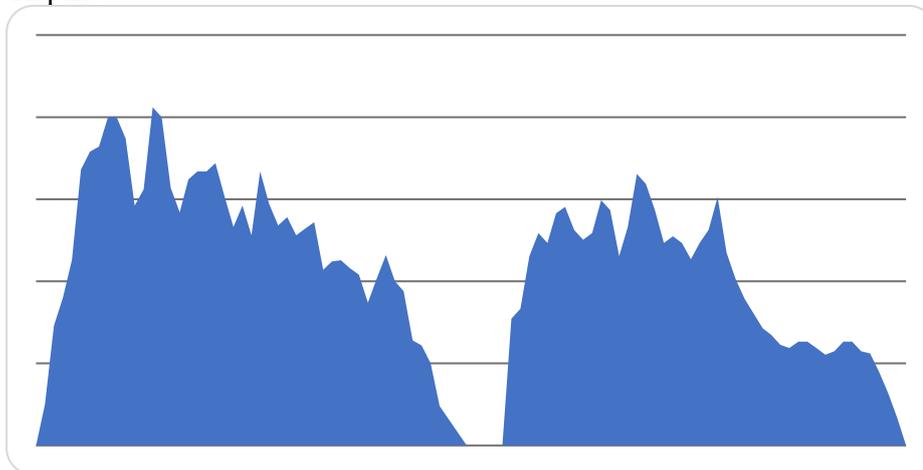


Рисунок 4 – Диаграмма распределения нагрузки на серверы системы видеоконференцсвязи, полученная в результате проведения вычислительного эксперимента для последовательных пар

Figure 4 - Diagram of load distribution on the servers of the video conferencing system, obtained as a result of the computational experiment for two consecutive classes

Эта диаграмма по своему характеру соответствует эмпирическим данным реального функционирования сервера ВВВ, диаграмма распределения нагрузки по времени которого показана на Рисунке 5. Диаграмма демонстрирует реальную загрузку серверов системы ВВВ. Данные фиксируются в течение суток по всему университету и

описывают процесс формирования нагрузки аналогичный полученному в результате вычислительного эксперимента на небольшом фрагменте расписания. Заметны пики нагрузки, которые формируются в начале каждой пары, затем уменьшающиеся с течением времени.

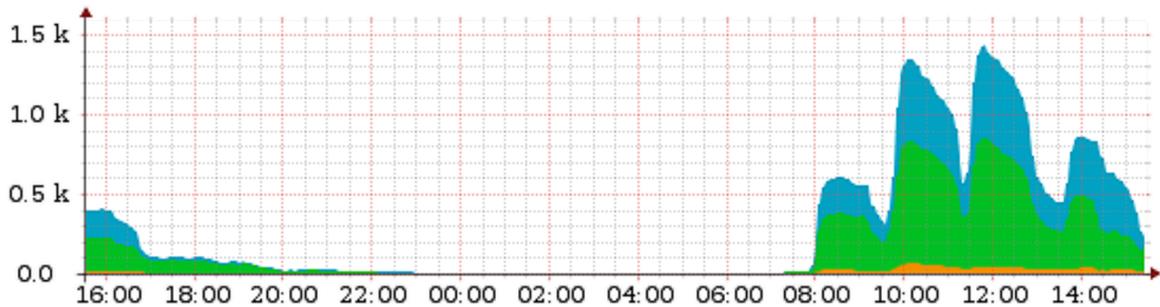


Рисунок 5 – Диаграмма нагрузки на серверную подсистему в течение суток

Figure 5 - Diagram of the load on the server subsystem during the day

Расширение предлагаемой формальной модели позволит получать более точные графики формирования серверной нагрузки в соответствии с имеющимся расписанием занятий.

Заключение

Представленный в статье метод динамического моделирования серверной нагрузки позволяет анализировать поведение системы видеоконференцсвязи в соответствии с расписанием занятий. При этом учитываются случайные факторы, которые имеют место в процессе функционирования реальных систем.

Элементами новизны представленного решения является использование специальным образом определённых сетей Петри, которые позволяют реализовать стохастический процесс функционирования видеоконференции и настраивать приоритеты переходов в соответствии с эмпирически полученными данными. Результаты вычислительного эксперимента продемонстрировали адекватность полученных результатов реальным данным серверной нагрузки.

На основе предложенного подхода планируется разработка метода моделирования нагрузки на серверные подсистемы иной природы и назначения. Особый интерес в этом случае представляют различные алгоритмы балансировки серверной нагрузки и сравнительный их анализ. Описанный подход может быть применен не только при анализе систем видеоконференцсвязи, но и в иных случаях, когда известны статистические распределения получения запросов на обработку и необходимо построить прогноз формирования нагрузки на систему, определить оптимальный алгоритм балансировки нагрузки.

В дальнейшем планируется развитие представленного подхода с точки зрения разработки аналитического программного инструментария, интеграции его в системы администрирования для проведения анализа функционирования информационных систем, прогнозирования динамики нагрузки на серверные подсистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Naeve A., Yli-Luoma P., Kravcik M., Lytras M.D. A modelling approach to study learning processes with a focus on knowledge creation. *Int. J. Technology Enhanced Learning*.

- 2008;1(1/2):1–34. Доступно по: <https://core.ac.uk/download/pdf/191008631.pdf> (дата обращения 12.08.2020).
2. Kuhrmann M., Fernández D.M., Münch J. Teaching Software Process Modeling. *Proceedings – International Conference on Software Engineering*. 2013, DOI: 10.1109/ICSE.2013.6606665
 3. Solomon B. Models and concepts of curriculum implementation, some definitions and influence of implementation. *Conference proceedings. Curriculum change and evaluation*. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.17850.24009
 4. Picciano A. G. Theories and frameworks for online education: Seeking an integrated model. *Online Learning*. 2017;21(3):166-190. DOI: 10.24059/olj.v21i3.1225
 5. Huang, Y., Chung, T. Modeling and Analysis of Urban Traffic Lights Control Systems Using Timed CP-nets. *Journal of information science and engineering*. 2008;24:875-890. Доступно по: http://www.iis.sinica.edu.tw/page/jise/2008/200805_13.pdf (дата обращения: 05.10.2020).
 6. DiCesare F., Kulp P.T., Gile M., List G. The application of Petri nets to the modeling, analysis and control of intelligent urban traffic networks. *Valette R. (eds) Application and Theory of Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science*. 1994:815. Доступно по: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-540-58152-9_2 (дата обращения: 21.11.2020)
 7. Benarbia T., Labadi K., Moumen D., Chayet M. Modeling and Control of Self-Service Public Bicycle Systems by Using Petri Nets. *International Journal of Modelling Identification and Control*. 2012;17:173-194.
 8. Мальков М. В., Малыгина С. Н. Сети Петри и моделирование. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2010;3:35-40.
 9. Verbeek H.M.W., Wynn M.T., van der Aalst W.M.P., Hofstede A.H.M. Reduction rules for reset/inhibitor nets. *Journal of Computer and System Sciences*. 2010;76(2):125-143.
 10. Best E., Koutny M. Petri net semantics of priority systems. *Theoretical Computer Science*. 1992;96(1):175-215.
 11. Lomazova I., Popova-Zeugmann L.: Controlling Petri net behavior using priorities for transitions. *Fundamenta Informatica*. 2016;143(1-2):101-112.
 12. Рябцев В.Г., Уткина Т.Ю. Информационная технология проектирования систем автоматизированного управления технологическими процессами. *Системы управления, связи и безопасности*. 2016;1:207-237.
 13. Наумов В. С. Использование сетей Петри при моделировании процесса транспортно-экспедиционного обслуживания. *Автомобильный транспорт: сб. науч. тр.* 2009;24:120-124.
 14. Anagnostopoulos T., Zaslavsky A., Medvedev A., Khoruzhnikov S. Top-k Query based Dynamic Scheduling for IoT-enabled Smart City Waste Collection. *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM 2015)*, Pittsburgh, US (2015).
 15. Dolinina O., Pechenkin V., Gubin N. Combined Intellectual and Petri Net with Priorities Approach to the Waste Disposal in the Smart City. *Recent Research in Control Engineering and Decision Making. Studies in Systems, Decision and Control*. 2019;199:755-767 DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_61

REFERENCES

1. Naeve A., Yli-Luoma P., Kravcik M., Lytras M.D. A modelling approach to study learning processes with a focus on knowledge creation. *Int. J. Technology Enhanced Learning*. 2008; 1(1/2):1–34. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/191008631.pdf> (accessed 12.08.2020).
2. Kuhrmann M., Fernández D.M., Münch J. Teaching Software Process Modeling. *Conference Pr. – International Conference on Software Engineering*. 2013, DOI: 10.1109/ICSE.2013.6606665
3. Solomon B. Models and concepts of curriculum implementation, some definitions and influence of implementation. Conference pr. Curriculum change and evaluation, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.17850.24009
4. Picciano A. G. Theories and frameworks for online education: Seeking an integrated model. *Online Learning*. 2017;21(3):166-190. DOI: 10.24059/olj.v21i3.1225
5. Huang, Y., Chung, T.: Modeling and Analysis of Urban Traffic Lights Control Systems Using Timed CP-nets. *Journal of information science and engineering*. 2008;24:875-890. Available at: http://www.iis.sinica.edu.tw/page/jise/2008/200805_13.pdf (accessed: 05.10.2020).
6. DiCesare F., Kulp P.T., Gile M., List G. The application of Petri nets to the modeling, analysis and control of intelligent urban traffic networks. *Valette R. (eds) Application and Theory of Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science*. 1994;815. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F3-540-58152-9_2 (accessed: 21.11.2020)
7. Benarbia T., Labadi K., Moumen D., Chayet M. Modeling and Control of Self-Service Public Bicycle Systems by Using Petri Nets. *International Journal of Modelling Identification and Control*. 2012;17:173-194.
8. Malkov M. V., Maligina S. N. *Petri nets and modeling* // Proceedings of the Kolsk science center RAS. 2010;3:35-40 (In Russ).
9. Verbeek H.M.W., Wynn M.T., van der Aalst W.M.P., Hofstede A.H.M. Reduction rules for reset/inhibitor nets. *Journal of Computer and System Sciences*. 2010;76(2):125-143.
10. Best E., Koutny M. Petri net semantics of priority systems. *Theoretical Computer Science*. 1992;96(1):175-215.
11. Lomazova I., Popova-Zeugmann L.: Controlling Petri net behavior using priorities for transitions. *Fundamenta informatica*. 2016;143(1-2):101-112.
12. Ryabtsev, V., Utkina T.: Information technology for design of automated control of technological processes systems. *Control, communication and security systems*. 2016;1:207-239 (In Russ).
13. Naumov V. Petri nets in modeling the process of freight forwarding services // *Automobile Transport* (Kharkov). 2009;24:120-124 (In Russ).
14. Anagnostopoulos T., Zaslavsky A., Medvedev A., Khoruzhnikov S. Top-k Query based Dynamic Scheduling for IoT-enabled Smart City Waste Collection. *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM 2015), Pittsburgh, US*. 2015.
15. Dolinina O., Pechenkin V., Gubin N. Combined Intellectual and Petri Net with Priorities Approach to the Waste Disposal in the Smart City. *Recent Research in Control Engineering and Decision Making. Studies in Systems, Decision and Control*. 2019;199:755-767. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_61

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Печенкин Виталий Владимирович, кандидат физ.-мат. наук, кафедра прикладных информационных технологий, ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.", Саратов, Российская Федерация.

e-mail: pechenkinvv@mail.ru

ORCID: [0000-0002-5043-1891](https://orcid.org/0000-0002-5043-1891)

Vitaly V. Pechenkin, PhD (Phys.–Math.), Professor, Applied Information Technologies Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yuri Gagarin State Technical University of Saratov", Saratov, Russian Federation

Аль–Хазраджи Али Тхаир Хамид, аспирант, кафедра прикладных информационных технологий, ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.", Саратов, Российская Федерация.

e-mail: ali101.thair@gmail.com

Ali Thaeer Hameed Al-Khazraji, PhD Student, Applied Information Technologies Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yuri Gagarin State Technical University of Saratov", Saratov, Russian Federation

Гельбух Сергей Сергеевич, кандидат физ.-мат. наук, кафедра информационно-коммуникационных систем и программной инженерии, ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.", Саратов, Российская Федерация.

e-mail: serge@sstu.ru

Sergey S. Gelbukh, PhD (Phys.–Math.) Associate Professor, Information and Communication Systems and Software Engineering Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yuri Gagarin State Technical University of Saratov", Saratov, Russian Federation