Известия Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины, № 6 (147), 2024

УДК 519.872 EDN: SHRJIO

Анализ ожидаемого дохода систем в G-сети с сигналами и с контрольной и карантинной очередями

Д.Я. Копать

Статья посвящена исследованию G-сети с сигналами с системами, в которых присутствуют контрольные и карантинные очереди (ККО). Целью исследования является анализ изменения с течением времени ожидаемых доходов систем сети. Отличием исследуемой сети по сравнению с другими ККО является то, что после успешного обмана сигналом проверку на стандартность она может попасть в очередь на обслуживание и удалить одну положительную заявку или переместить её в контрольную очередь другой СМО. Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании доходов в КС с установленным АПО.
Ключевые слова: ожидаемые доходы, сигналы, антивирусное программное обеспечение, G-сеть, информационно-телекоммуникационные системы и сети, среднее число заявок в системах сети.

The article is devoted to the study of the G-network with signals with systems in which control and quarantine queues (CQQ) are present. The purpose of the study is to investigate the change over time in the expected revenues of network systems. The difference between the studied network and the other CQQs is that after a successful deception by a signal, a standardness check can get into the service queue and delete one positive request or move it to the control queue of another CQQ. The obtained results can be used in forecasting revenues in a CS with established antivirus software.
Keywords: expected revenues, signals, antivirus software, G-network, information and telecommunication systems and networks, average number of claims in network systems.

Введение. Первая модель компьютерной сети (КС) с возможностью проникновения в проявления компьютерных вирусов была исследована в стационарном режиме статье [1], а в переходном в статье [2]. Первая математическая модель компьютерного антивирусного программного обеспечения (АПО) без учета поведения вирусов с помощью сетей массового обслуживания (СеМО) была исследована Ю.Е. Летунович и О.В. Якубович в работе [3], изданной в 2017 г. Затем развитие данных моделей пошло в двух направлениях. Первое из них связано с моделями действия компьютерных систем и сетей в случае, когда отрицательная заявка после ошибки при проверке на стандартность уничтожает одну положительную заявку и уходит из сети. В таком направлении сохраняется преемственность с работами E. Gelenbe относительно действия отрицательных заявок. Работами, развивающими первое направление исследований, являются работы [4]–[5]. Во второй из этих работ действие отрицательной заявки расширяется: после уничтожения положительной заявки отрицательная способна к перемещению по системам сети до тех пор, пока не будет обнаружена проверкой на стандартность в других системах. Примерами работ в данном направлении являются работы [6]–[7]. Дальнейшее развитие моделей АПО началось в сторону обобщения действия особенностей G-сетей для сетей с контрольными и карантинными очередями. Ненадёжность ЛО была обобщена в статье [8]. В данной статье мы обобщим действие сигналов, при этом сохранив принцип действия сигналов в соответствии с работами E. Gelenbe [9]: с определённой вероятностью она уничтожает одну положительную заявку, действуя как отрицательная заявка, а с другой – перемещает отрицательную заявку между системами сети. Данное действие сигнала в переходном режиме проанализировано в работах [10]–[11]. В данной работе и в последующих мы займёмся обобщением действия сигнала на случай, когда после этого срабатывания он может переместиться в контрольную очередь другой СМО и будет совершать движение по сети до тех пор, пока не будет обнаружен при проверке на стандартность.

1. Описание стохастической модели КС с АПО. Рассмотрим стохастическую модель КС с АПО, описанную в [4]. Она представляет собой G-сеть, состоящую из n систем массового обслуживания (СМО) $S_i,\ i=\overline{1,n}$, в каждую из которых поступают простейшие потоки положительных заявок и сигналы с интенсивностями $\lambda_{0i}^{+},\ \lambda_{0i}^{(c)},\ i=\overline{1,n}$, соответственно.

Перед поступлением на обслуживание заявка или сигнал, поступившие в *i*-ю СМО, становится в контрольную очередь (КонО) для проверки на стандартность. После завершения ожидания заявки в очереди заявка или сигнал проверяются на стандартность в течении времени, имеющего экспоненциальное распределение с параметром $\mu_i^{(v)}, i=\overline{1,n}$. Качество проверки заявок на стандартность в контрольной очереди *i*-й СМО следующее: вероятность правильного определения положительной заявки p_i^+, а сигнала p_i^-. В случае правильного определения положительной заявки она переходит в очередь этой системы для обработки; иначе она отправится в карантинннную очередь (КарО) на лечение. В случае правильной идентификации сигнала он переходит в КарО на лечение; иначе сигнал может ошибочно быть признан положительным и поступит в очередь *i*-й СМО на обслуживание, где с вероятностью q_{i0} он немедленно уничтожает положительную заявку, если эта система не пустая, или с вероятностью q_{ij} сигнал сработает как триггер и переместит заявку в контрольную очередь *j*-й СМО, $j=\overline{1,n}$.

Успешно прошедшая проверку на стандартность в системе S_i положительная заявка после завершения ожидания в очереди на обслуживание обрабатывается линией обслуживания в течении времени, распределенного экспоненциально с параметром μ_i, $i=\overline{1,\ n}$. Положительная заявка после обработки в системе S_i с вероятностью p_{ij}^+ переходит в КонО системы S_j как положительная заявка, с вероятностью p_{ij}^- – как отрицательная заявка и с вероятностью $p_{i0}=1-\sum_{j=1}^{n}\left(p_{ij}^+ + p_{ij}^-\right)$ покидает сеть, $i,\ j=\overline{1,\ n}$.

Заявки, признанные сигналами, становятся в очередь на лечение в карантине. Предположим, что длительность лечения заявки в карантине *i*-й СМО – это СВ экспоненциально распределенная с параметром $\mu_i^{(c)}, i=\overline{1,\ n}$. При лечении файл достаётся из папки по дисциплине FIFO. Определим вероятность $p_i^{(s)}, i=\overline{1,n}$, что заявка в КарО будет вылечена, после чего она направляется на обслуживание в очередь *i*-й СМО. Тогда с вероятностью $1-p_i^{(s)}$ заявка из карантина удаляется из сети.

Состояние описанной сети определяется вектором:

$$\left(\vec{k},\vec{l},t\right)=\left(\vec{k}_1,\vec{k}_2,...,\vec{k}_n,\vec{l}_1,\vec{l}_2,...,\vec{l}_n;t\right), \tag{1}$$

где $\vec{k}_i=\left(k_i^{(p)},k_i^{(s)}\right)$, $\vec{l}_i=\left(l_i^{(n)},l_i^{(c)}\right)$, $k_i^{(p)},k_i^{(s)}$ – это число положительных заявок в контрольной очереди и число заявок на обслуживании *i*-й СМО соответственно, а $l_i^{(n)},l_i^{(c)}$ – число сигналов в контрольной очереди *i*-й СМО и число заявок в карантине *i*-й СМО соответственно. Таким образом, вектор состояния сети имеет размерность 2*n*. Пусть заявки выбираются на проверку на стандартность из очереди случайным образом. Тогда вероятность того, что будет проверена на стандартность положительная заявка, может быть аппроксимируем следующей системой нелинейных уравнений:

$$q_i^+=\frac{\lambda_{0i}^+ + \sum_{j=1}^{n}\mu_j p_{ji}^+ + \sum_{j=1}^{n}\mu_j^{(v)}\left(1-q_j^+\right)\left(1-p_j^-\right)p_{ji}^- q_{ji} - \mu_i^{(v)}q_i^+}{\lambda_{0i}^+ + \lambda_{0i}^- + \sum_{j=1}^{n}\mu_j\left(p_{ji}^+ + p_{ji}^-\right) + \sum_{j=1}^{n}\mu_j^{(v)}\left(1-q_j^+\right)\left(1-p_j^-\right)p_{ji}^- q_{ji} - \mu_i^{(v)}}, i=\overline{1,n}.$$

2. Нахождение ожидаемых доходов систем сети. Найдем функциональную зависимость изменения доходов СМО S_i по методике работы [6]. Обозначим через $V_i(t)$ ее доход в момент времени *t*. Пусть в начальный момент времени доход системы равен $V_i(0)=v_{i0}$. Доход этой СМО в момент времени $t+\Delta t$ можно представить в виде

$$V_i\ (t+\Delta t)=V_i(t)+\Delta V_i(t,\Delta t), \tag{2}$$

где $\Delta V_i(t,\Delta t)$ – изменение дохода системы S_i на интервале времени $[t,\ t+\Delta t)$. Запишем возможные изменения дохода системы S_i на интервале времени $[t,\ t+\Delta t)$ и их вероятности:

1) в КонО СМО S_i поступает положительная заявка из внешней среды и приносит системе доход R_{0i}^{+} с вероятностью $\lambda_{0i}^{+}\Delta t+o(\Delta t)$, где R_{0i}^{+} – СВ с м.о. $M\left\{R_{0i}^{+}\right\}=a_{0i}^{+}$, $i=\overline{1,n}$, характеризующая ценность поступившей информации;

2) в КонО i-й СМО за время Δt поступит сигнал и доход системы уменьшится на величину R_{0i}^{-} с вероятностью $\lambda_{0i}^{(c)}\Delta t+o(\Delta t)$, где R_{0i}^{-} – СВ с м.о. $M\left\{R_{0i}^{-}\right\}=a_{0i}^{-}$, $i=\overline{1,n}$, характеризующая потенциальную опасность заражения узла сети;

3) положительная заявка после проверки на стандартность в i-й СМО будет признана таковой и перейдет в очередь для обслуживания, при этом доход системы составит $-r_i^{+}$ с вероятностью $\mu_i^{(v)}q_i^{+}p_i^{+}u\left(k_i^{(p)}\right)\Delta t+o(\Delta t)$, где r_i^{+} – СВ с м.о. $M\left\{r_i^{+}\right\}=b_i^{+}$, $i=\overline{1,n}$, соответствует снижению производительности системы во время проверки файла;

4) сигнал после проверки на стандартность в i-ой СМО будет признан положительной заявкой, перейдет в очередь на обслуживание и удалит 1 положительную заявку, доход системы составит $-R_i^{+}$ с вероятностью $\mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})(1-p_i^{-})q_{i0}u\left(l_i^{(n)}\right)\Delta t+o(\Delta t)$, где R_i^{+} – СВ с м.о. $M\left\{R_i^{+}\right\}=a_i^{+}$, $i=\overline{1,n}$, соответствует инфицированию файла в узле сети, за счет чего он становиться недоступным для обработки. Если в системе в этот момент времени нет заявок на обслуживании, то сигнал покидает сеть и доход системы составит r_i^{-} с вероятностью $\mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})(1-p_i^{-})u\left(l_i^{(n)}\right)\left(1-u\left(k_i^{(s)}\right)\right)\Delta t+o(\Delta t)$, где r_i^{-} – СВ с м.о. $M\left\{r_i^{-}\right\}=b_i^{-}$, $i=\overline{1,n}$, соответствует устранению потенциальной угрозы инфицирования всей сети;

5) с вероятностью $\mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})(1-p_i^{-})q_{ij}u\left(l_i^{(n)}\right)\Delta t+o(\Delta t)$ сигнал после проверки на стандартность в i-ой СМО будет признан положительной заявкой, перейдет в очередь на обслуживание и переместит 1 положительную заявку в контрольную очередь j-ой СМО, доход системы S_i уменьшится на r_{ij}^{-}, а S_j увеличится на данную величину, r_{ij}^{-} где – СВ с м.о. $M\left\{r_{ij}^{-}\right\}=b_{ij}^{-}$, $i,\, j=\overline{1,n}$, соответствует потенциальной угрозе увеличения затрат на обслуживание заявки всей сети;

6) положительная заявка после проверки на стандартность в i-й СМО будет признана сигналом и перейдет в карантин для лечения, доход системы составит $-R_i^{c}$ с вероятностью $\mu_i^{(v)}q_i^{+}(1-p_i^{+})u\left(k_i^{(p)}\right)\Delta t+o(\Delta t)$, где R_i^{c} – СВ с м.о. $M\left\{R_i^{c}\right\}=a_i^{c}$, $i=\overline{1,n}$, характеризует убытки, связанные с блокированием антивирусом легитимного ПО;

7) сигнал после проверки на стандартность в i-й СМО будет признан сигналом и перейдет в карантин для лечения, доход системы составит $r_i^{(c)}$ с вероятностью $\mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})p_i^{-}u\left(l_i^{(n)}\right)\Delta t+o(\Delta t)$, где $r_i^{(c)}$ – СВ с м.о. $M\left\{r_i^{(c)}\right\}=b_i^{(c)}$, $i=\overline{1,n}$, соответствует устранению потенциальной угрозы инфицирования всей сети;

8) карантинному узлу i-й СМО удастся вылечить сигнал, и он отправляется в очередь на обслуживание в i-ю СМО с вероятностью $\mu_i^{(c)}p_i^{(s)}u\left(l_i^{(c)}\right)\Delta t+o(\Delta t)$, доход системы будет равен количеству восстановленной информации и составит R_i^{+}, $i=\overline{1,n}$;

9) карантинному узлу не удастся вылечить сигнал, и он покидает сеть с вероятностью $\mu_i^{(c)}\left(1-p_i^{(s)}\right)u\left(l_i^{(c)}\right)\Delta t+o(\Delta t)$, не принеся ей вреда, расход системы будет равен количеству потерянной информации и составит $-R_i^{+}$, $i=\overline{1,n}$;

10) время обслуживания заявки в j-й СМО закончилось, и он направится в КонО i-й СМО как положительная заявка, доход системы S_i составит R_{ji}^{+} с вероятностью $\sum_{j=1}^{n} \mu_j p_{ji}^{+} u\left(k_j^{(s)}\right)\Delta t + o(\Delta t)$, где R_{ij}^{+} – СВ с м.о. $M\left\{R_{ij}^{+}\right\} = a_{ij}^{+}$, $i, j = \overline{1,n}$, характеризующая ценность поступившей информации; при этом доход системы S_j не уменьшится, так как все процессы, связанные с обработкой этого файла в системе, будут уже выполнены;

11) время обслуживания заявки в j-й СМО закончилось, и она направляется в КонО i-й СМО как сигнал, доход системы S_i составит R_{ji}^{-} с вероятностью $\sum_{j=1}^{n} \mu_j p_{ji}^{-} u\left(k_j^{(s)}\right)\Delta t + o(\Delta t)$, где R_{ij}^{-} – СВ с м.о. $M\left\{R_{ij}^{-}\right\} = a_{ij}^{-}$, $i = \overline{1,n}$, характеризующая потенциальную опасность потери информации за счет инфицирования узла сети; при этом доход системы S_j не уменьшится, так как все процессы, связанные с обработкой этого файла в системе, будут уже выполнены;

12) с вероятностью $\mu_i\, p_{i0} u\left(k_i^{(s)}\right)\Delta t + o(\Delta t)$ время обслуживания заявки в i-й СМО закончилось, и она уходит из сети, не изменяя доход системы S_i, $i = \overline{1,n}$;

13) с вероятностью

$$1-\Bigg(\lambda_{0i}^{+}+\lambda_{0i}^{(c)}+\mu_i^{(v)} q_i^{+} u\left(k_i^{(p)}\right)+\mu_i^{(v)}(1-q_i^{+}) u\left(l_i^{(n)}\right)\left(1+(1-p_i^{-})\left(1-u\left(k_i^{(s)}\right)\right)\right)+$$
$$+\mu_i^{(c)} u\left(l_i^{(c)}\right)+\mu_i p_{i0} u\left(k_i^{(s)}\right)+\sum_{j=1}^{n}\mu_j\left(p_{ji}^{-} u\left(k_j^{(s)}\right)+p_{ji}^{+} u\left(k_j^{(s)}\right)\right)\Bigg)\Delta t+o(\Delta t)$$

состояние сети не изменится.

Кроме того, за каждый малый промежуток времени Δt система S_i несет убытки (уменьшение производительности, снижение скорости выполнения рутинных операций за счет потребления АПО ресурсов процессора) в размере $r_i\,\Delta t$, где r_i – СВ с м.о. $M\{r_i\} = b_i$, $i = \overline{1,n}$. Пусть СВ изменения дохода от переходов между состояниями сети R_{ij}^{+}, R_{ij}^{-}, R_{0i}^{+}, R_{0i}^{-}, r_i^{+}, r_i^{-}, R_i^{c} являются независимыми по отношению к СВ r_i, $i, j = \overline{1,n}$, тогда из вышеуказанного следует

$$\Delta V_i(t,\Delta t)=\begin{cases} R_{0i}^{+}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \lambda_{0i}^{+}\Delta t+o(\Delta t),\\ -R_{0i}^{-}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \lambda_{0i}^{(c)}\Delta t+o(\Delta t),\\ -r_i^{+}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \mu_i^{(v)}q_i^{+}p_i^{+}u\left(k_i^{(p)}\right)\Delta t+o(\Delta t),\\ -R_i^{+}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \mu_i^{(c)}(1-p_i^{(s)})u\left(l_i^{(c)}\right)\Delta t+o(\Delta t),\\ -r_{ij}^{-}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})(1-p_i^{-})q_{ij}u\left(k_i^{(s)}\right)\Delta t+o(\Delta t),\\ -R_i^{c}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \mu_i^{(v)}q_i^{+}(1-p_i^{+})u\left(k_i^{(p)}\right)\Delta t+o(\Delta t),\\ -r_i^{-}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})(1-p_i^{-})q_{i0}u\left(l_i^{(n)}\right)\Delta t+o(\Delta t),\\ r_i^{(c)}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})p_i^{-}u\left(l_i^{(n)}\right)\Delta t+o\left(\Delta t\right)\\ R_i^{+}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \mu_i^{(c)}p_i^{(s)}u\left(l_i^{(c)}\right)\Delta t+o(\Delta t),\\ R_{ji}^{+}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \sum_{j=1}^{n}\mu_j p_{ji}^{+}u\left(k_j^{(s)}\right)\Delta t+o(\Delta t),\\ -R_{ji}^{-}-r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad \sum_{j=1}^{n}\mu_j p_{ji}^{-}u\left(k_j^{(s)}\right)\Delta t+o(\Delta t),\\ -r_i\,\Delta t & \text{с вер-ю} \quad 1-\Big[\mu_i^{(v)}\left((1-q_i^{+})u\left(l_i^{(n)}\right)\left(1+(1-p_i^{-})\left(1-u\left(k_i^{(s)}\right)\right)\right)\right)+\\ & \qquad +\mu_i^{(v)}q_i^{+}u\left(k_i^{(p)}\right)+\lambda_{0i}^{+}+\lambda_{0i}^{(1)}+\mu_i^{(c)}u\left(l_i^{(c)}\right)+\\ & \qquad +\mu_i p_{i0}u\left(k_i^{(s)}\right)+\sum_{j=1}^{n}\mu_j\left(p_{ji}^{+}+p_{ji}^{-}\right)u\left(k_j^{(s)}\right)\Big]\Delta t+o(\Delta t). \end{cases} \tag{3}$$

Аналогично [4] получаем:

$$\begin{aligned}\mathbf{E}\{\Delta V_i(t,\Delta t)/(\vec{k},\vec{l},t)\}=\Big[&a_{0i}^{+}\lambda_{0i}^{+}-a_{0i}^{-}\lambda_{0i}^{(c)}+\mu_i^{(v)}q_i^{+}\left((a_i^{c}-b_i^{+})p_i^{+}-a_i^{c}\right)u\left(k_i^{(p)}\right)+\\ &+a_i^{+}\mu_i^{(c)}u\left(l_i^{(c)}\right)-\mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})\left(b_{ij}^{-}q_{ij}+q_{i0}a_i^{+}-q_{i0}a_i^{+}p_i^{-}\right)u\left(l_i^{(n)}\right)-\\ &-b_i^{(c)}\mu_i^{(v)}(1-q_i^{+})p_i^{-}u\left(l_i^{(n)}\right)+\\ &+\sum_{j=1}^{n}\mu_j\left(a_{ji}^{+}p_{ji}^{+}-a_{ji}^{-}p_{ji}^{-}\right)u\left(k_j^{(s)}\right)-b_i\Big]\Delta t+o(\Delta t).\end{aligned}$$

Пусть сеть функционирует в режиме насыщения, т. е. $k_i^{(p)}(t),k_i^{(s)}(t)$, $l_i^{(n)}(t),l_i^{(c)}(t)>0$ в любой момент времени $t>0$, в этом случае функция Хэвисайда равна 1. В таком режиме функционирования СеМО не выходит в стационарный режим. В этом случае выражение для изменения ожидаемого дохода примет вид:

$$\begin{aligned}\mathbf{E}\{\Delta V_i(t,\Delta t)/(\vec{k},\vec{l},t)\}=\Big[&a_{0i}^{+}\lambda_{0i}^{+}-a_{0i}^{-}\lambda_{0i}^{(c)}+\mu_i^{(v)}q_i^{+}\left((a_i^{c}-b_i^{+})p_i^{+}-a_i^{c}\right)+\\ &+a_i^{+}\mu_i^{(c)}-\mu_i^{(v)}\left(1-q_i^{+}\right)\left(1-p_i^{-}\right)\left(b_{ij}^{-}q_{ij}+q_{i0}a_i^{+}\right)-\\ &-b_i^{(c)}\mu_i^{(v)}\left(1-q_i^{+}\right)p_i^{-}+\sum_{j=1}^{n}\mu_j\left(a_{ji}^{+}p_{ji}^{+}-a_{ji}^{-}p_{ji}^{-}\right)-b_i\Big]\Delta t+o(\Delta t).\end{aligned} \tag{4}$$

Пусть $v_i(t)=\mathbf{E}\left[V_i(t)\right]$, $i=\overline{1,n}$. Подставляя в (2) соотношение (4) и переходя к пределу при $\Delta t\to 0$, получим ДУ для средней величины дохода СМО сети:

$$\begin{aligned}\frac{dv_i(t)}{dt}=&a_{0i}^{+}\lambda_{0i}^{+}-a_{0i}^{-}\lambda_{0i}^{(c)}+\mu_i^{(v)}q_i^{+}\left((a_i^{c}-b_i^{+})p_i^{+}-a_i^{c}\right)+\\ &+a_i^{+}\mu_i^{(c)}-\mu_i^{(v)}\left(1-q_i^{+}\right)\left(1-p_i^{-}\right)\left(b_{ij}^{-}q_{ij}+q_{i0}a_i^{+}\right)-\\ &-b_i^{(c)}\mu_i^{(v)}\left(1-q_i^{+}\right)p_i^{-}+\sum_{j=1}^{n}\mu_j\left(a_{ji}^{+}p_{ji}^{+}-a_{ji}^{-}p_{ji}^{-}\right)-b_i.\end{aligned} \tag{7}$$

Зная начальные условия $v_i(0)=v_{i0}$, $i=\overline{1,n}$, получим решение уравнения (7) в виде:

$$v_i(t) = v_{i0} + \Big[a_{0i}^{+}\lambda_{0i}^{+} - a_{0i}^{-}\lambda_{0i}^{(c)} + \mu_i^{(v)} q_i^{+} \left((a_i^{c} - b_i^{+}) p_i^{+} - a_i^{c} \right) + \\ + a_i^{+}\mu_i^{(c)} - \mu_i^{(v)} \left(1 - q_i^{+}\right)\left(1 - p_i^{-}\right)\left(b_{ij}^{-} q_{ij} + q_{i0} a_i^{+}\right) - \\ - b_i^{(c)}\mu_i^{(v)} \left(1 - q_i^{+}\right) p_i^{-} + \sum_{j=1}^{n} \mu_j \left(a_{ji}^{+} p_{ji}^{+} - a_{ji}^{-} p_{ji}^{-} \right) - b_i \Big] t.$$

Заключение. В статье представлена модель КС с АПО с возможностью управлять нагрузкой в серверах сети посредством перераспределения запросов. Математической моделью данной сети являются G-сети с системами с контрольными и карантинными очередями и сигналами. Получены выражения для средних доходов систем КС с АПО. Дальнейшие исследования в этом направлении будут связаны с изменением действия сигнала: для начала с возможностью распространения перемещения сигнала по системам сети, а затем с возможностью перемещения группы заявок между системами сети.

Литература

1. Gelenbe, E. Product form queueing networks with negative and positive customers / E. Gelenbe // Journal of Applied Probability. – 1991. – Vol. 28. – P. 656–663.

2. Matalytski, M. Non-stationary analysis of queueing network with positive and negative messages / M. Matalytski, V. Naumenko // Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics. – 2013. – Vol. 12, № 2. – P. 61–71.

3. Летунович, Ю. Е. Открытые марковские сети массового обслуживания с контрольными очередями и карантинным узлом / Ю. Е. Летунович, О. В. Якубович // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 41. – С. 32–38.

4. Копать, Д. Я. Математическая модель компьютерных сетей с антивирусным программным обеспечением / Д. Я. Копать, М. А. Маталыцкий, В. В. Науменко // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2 : Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2021. – № 3. – С. 37–45.

5. Копать, Д. Я. Асимптотический анализ G-сети с многолинейными системами с контрольными и карантинными очередями / Д. Я. Копать // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56). – С. 48–55.

6. Паньков, А. В. Нахождение вероятностно-временных характеристик замкнутой марковской сети с центральной системой и доходами / А. В. Паньков, М. А. Маталыцкий // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2 : Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2006. – № 3. – С. 22–28

7. Косарева, Е. В. Имитационное моделирование доходов систем в G-сети с контрольной и карантинной очередями / Е. В. Косарева, Д. Я. Копать// Современные исследования : теория, практика, результаты : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 16 ноября 2023 г. – М. : Изд-во ЦРОН ; Изд-во АЛЕФ, 2023. – С. 120–128.

8. Копать, Д. Я. Нахождение ожидаемых доходов систем в G-сети с ненадёжными системами с контрольной и карантинной очередями / Д. Я. Копать // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ–2022) : материалы XXII Междунар. конф. им. А.Ф. Терпугова, Томск, 4–9 декабря 2023 г. / редкол.: А. А. Назаров [и др.]. – Томск, 2023. – Т. 117. – С. 125.

9. Gelenbe, E. G-networks with signals and batch removal / E. Gelenbe // Probability in the Engineering and Informational Sciences. – 1993. – Vol. 7. – P. 335–342.

10. Matalytski, M. Investigation of G-network with signals at transient behavior / M. Matalytski, V. Naumenko // Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics. – 2014. – Vol. 13, iss. 1. – P. 75–86.

11. Matalytski, M. Analysis of the network with multiple classes of positive customers and signals at a nonstationary regime / M. Matalytski, D. Kopats // Probability in the Engineering and Informational Sciences. – 2019. – Vol. 33, № 3. – P. 404–416.

Гродненский государственный
университет имени Я. Купалы

Поступила в редакцию 14.02.2024