

УДК.: 621.3.016: 004.94

Аль Хакам Арфан<sup>1</sup>, С.М. Асанова<sup>1</sup>, А.Б. Калмурзаев<sup>1</sup>, К.Сатаркулов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова, 720044, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: [a\\_sm07@kstu.kg](mailto:a_sm07@kstu.kg)

<sup>2</sup>Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, 720055, Кыргызстан, г. Бишкек, ул. Скрябина 23, e-mail: [satarkulov46k@mail.ru](mailto:satarkulov46k@mail.ru)

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ В ПОНЯТИЯХ ТЕОРИИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ НА НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ В СРЕДЕ LABVIEW

Предложена постановка задачи с использованием понятия теории систем массового обслуживания (СМО), для исследования режимов работы обрабатывающих станков в графической среде LabVIEW. Сформулирована задача оценки сечения проводника, питающего группу электроприемников. При этом термин СМО, количество каналов (приборов) связан с понятиями длительно допустимого плотности тока и постоянного времени нагрева проводника. Рассмотрен алгоритм построения компьютерной модели для упрощенной задачи работы двух технологически связанных электроприемников. Отмечается возможность обобщения построенной компьютерной модели на большее количество электроприемников в сетевой формулировке в понятиях вычислительной сети Петри. Приводятся результаты моделирования.

**Ключевые слова:** расчет электрической нагрузки; выбор сечения проводника; группа электроприемников; компьютерное моделирование; система массового обслуживания (СМО); LabVIEW.

**Введение.** Выбор сечения проводника, питающего группу электрических приемников (ЭП), функционирующих в стохастическом режиме, производится на основе расчета электрических нагрузок (РЭН). Результаты РЭН являются исходными данными при решении всего комплекса технико-экономических задач, обеспечивающих эффективное проектирование, реконструкцию и эксплуатацию систем электроснабжения (СЭС).

Различные методы РЭН рассмотрены в общей теории электрических нагрузок (ЭН), которая в своем развитии прошла ряд этапов, начиная от эмпирических представлений 30-х годов до современных воззрений и методов, основанных на математическом аппарате теории вероятностей. В результате, предложены два метода определения расчетных нагрузок - метод упорядоченных диаграмм и статистический метод, которые приводят, как свидетельствуют результаты многочисленных исследований, к существенной погрешности расчетных характеристик графика: среднюю нагрузку и нагрузку по нагреву, что приводит к значительному увеличению первоначальных капитальных затрат на строительство, реконструкцию и эксплуатацию СЭС. По мнению многих исследователей, это объясняется тем, что применяемые на практике методы являются методами статического моделирования. Следовательно, необходимость в разработке динамических моделей и методов расчета ЭН является актуальной [1]. Некоторые динамические модели для выбора технических характеристик элементов электрических сетей рассмотрены в работах [2, 3]. В данной статье задача оценки сечения проводника, питающего группу ЭП в понятиях теории систем массового обслуживания [2], получила новую, более удобную формулировку, дающую возможность решения задачи с использованием компьютерного моделирования.

**Основные понятия системы массового обслуживания (СМО).** СМО – математический (абстрактный) объект, содержащий один или несколько *приборов П*

(каналов), обслуживающих заявки **З**, поступающие в систему, и **накопитель Н**, в котором находятся заявки, образующие **очередь О** и ожидающие обслуживания (рис.1) [4].

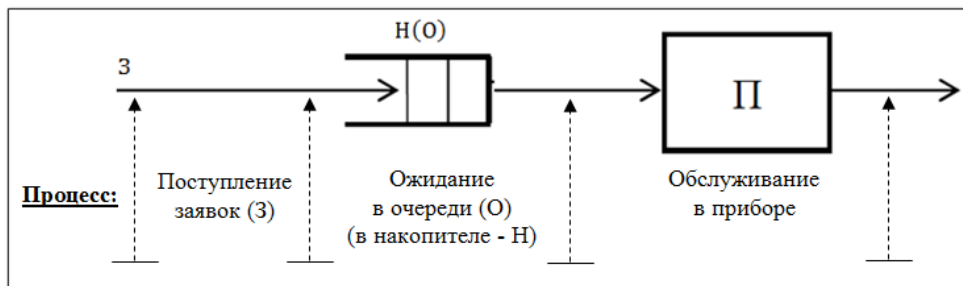


Рисунок 1 – Система массового обслуживания

*Заявка (требование, запрос, вызов, клиент)* – объект, поступающий в СМО и требующий обслуживания в обслуживающем приборе. Совокупность заявок, распределенных во времени, образует *поток заявок*.

*Обслуживающий прибор, или просто прибор (устройство, канал, линия)* – элемент СМО, функцией которого является обслуживание заявок. В каждый момент времени, в приборе на обслуживании может находиться только одна заявка.

*Обслуживание* – задержка заявки на некоторое время в обслуживающем приборе.

*Длительность обслуживания* – время задержки (обслуживания) заявки в приборе.

*Накопитель (буфер)* – совокупность мест для ожидания заявок перед обслуживающим прибором. Количество мест для ожидания определяет *ёмкость накопителя*.

По количеству обслуживающих приборов СМО делятся на: одноканальные, содержащие один прибор  $\Pi$ ; многоканальные, содержащие  $K$  обслуживающих приборов  $\Pi_1, \dots, \Pi_K$  ( $K > 1$ ).

**Формулировка поставленной задачи в понятиях теории ТМО.** Пусть имеется  $N$  – ое количество ЭП с мощностями  $P_i$  ( $i = 1 \div N$ ), подключенные к силовому пункту (СП), работающие в режиме случайного включения или отключения. При этом, вероятностные законы функционирования ЭП известны. СП получает питание от трансформаторной подстанции с помощью проводника с сечением  $S$  (рис.2). Стоит задача выбора значения  $S$  с использованием элементов теории СМО.

В предположениях, что ЭП имеют одинаковые мощности, задачу определения технических характеристик элементов электрических сетей в работе [2] свели к задачам теории массового обслуживания, а именно к  $n$  – канальной СМО с отказом (задача Эрланга) [4]. При этом, СМО считается одноканальной, если сечение проводника  $S_{пр} = S_{min}$ , и  $n$  – канальной при  $S_{пр} = n \cdot S_{min}$ , где  $S_{min} = f(P, T_0, ПРЭ)$  – минимальное сечение жилы, при котором кабель работает без перегрузки, и это сечение функционально зависит от мощност ЭП –  $P$ , постоянного времени нагрева проводника –  $T_0$ , и от показателей работы ЭП – ПРЭ. К ПРЭ относятся вероятностные законы функционирования ЭП, такие, как законы распределения случайных величин  $t_{в}$  – продолжительность включенного состояния ЭП,  $t_{п}$  – продолжительность паузы, т.е. не включённое состояние ЭП.

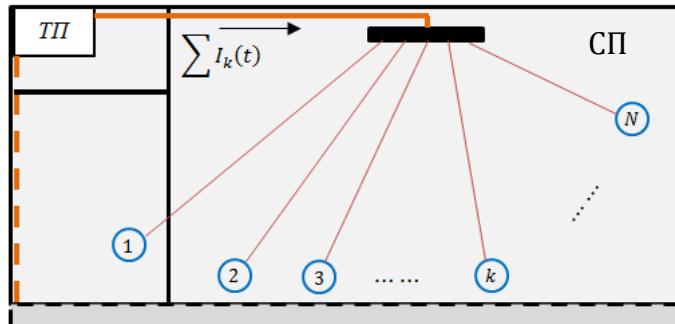


Рисунок 2 – Схематичное представление участка заводской сети

Математический анализ работы СМО [4, 5] облегчается, если процесс этой работы – марковский. Для этого достаточно, чтобы все потоки событий, переводящие систему из состояния в состояние, были простейшими. Если это свойство нарушается, то математическое описание процесса становится гораздо сложнее. Тем не менее, аппарат простейшей марковской теории массового обслуживания вполне пригоден для приближенного описания работы СМО даже в тех случаях, когда потоки событий не простейшие.

Рассмотрим вариант  $n$  – канальной СМО с отказом, полагая, что все потоки событий – простейшие.

Начальные условия: имеется  $n$  каналов передачи электрической энергии, на которые поступает поток заявок (поток включений ЭП) с интенсивностью  $\lambda$ . Поток отключений (поток выключения ЭП) имеет интенсивность  $\mu$ . Значения  $\lambda$  и  $\mu$  определяются из выражений [3]:

$$\lambda = \frac{n}{T_c}; \quad \mu = \frac{1}{t_{cp}}, \quad (1)$$

где  $n$  – общее число работающих ЭП;  $T_c$  – продолжительность смены, ч.;  $t_{cp}$  – среднее время работы одного ЭП в течение смены, ч.

Требуется найти финальные вероятности состояний СМО, через которые определяются характеристики ее эффективности. Для рассматриваемой задачи достаточно определение  $P_{отк}$  – вероятности отказа, т.е. того, что заявка покинет СМО не обслуженной. В нашем случае отказа на включение очередного ЭП не будет, **поэтому  $P_{отк}$  – это вероятность перегрузки нашей СМО (кабеля).**

Состояния системы  $S$  (СМО) нумеруются по числу заявок на включение ЭП, находящихся в системе (в данном случае, оно совпадает с числом занятых каналов):

$S_0$  – в СМО нет ни одной заявки на включение ЭП;

$S_1$  – в СМО находится одна заявка (один канал занят, остальные свободны);

.....

$S_k$  – в СМО находится  $k$  заявок на включение ЭП ( $k$  каналов заняты, остальные свободны).

.....

$S_n$  – в СМО находится  $n$  заявок на включение ЭП (все  $n$  каналов заняты).

Граф состояний СМО соответствует схеме гибели и размножения [4, 5] (рис.3). Из  $S_0$  в  $S_1$  систему переводит поток заявок на включения ЭП с интенсивностью  $\lambda$ . Тот же поток заявок переводит систему из любого левого состояния в соседнее правое (верхние стрелки на рис.3).

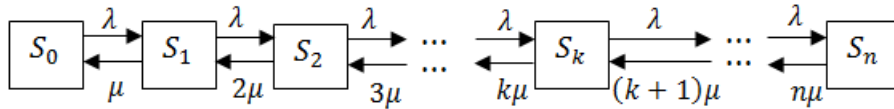


Рисунок 3 – Граф состояний СМО

Проставляются интенсивности у нижних стрелок, исходя из следующих соображений. Предположим, что система находится в состоянии  $S_1$  (функционирует один канал). Он производит  $\mu$  обслуживаний на отключение ЭП в единицу времени, поэтому проставляем у стрелки  $S_1 \rightarrow S_0$  интенсивность  $\mu$ . Далее представим себе, что система находится в состоянии  $S_2$  (функционирует два канала). В этом случае, чтобы системе перейти в  $S_1$ , нужно, чтобы закончилось обслуживание либо первого канала передачи электрической энергии, либо второго, при этом, чтобы суммарная интенсивность их потоков обслуживаний на отключении ЭП была равна  $2 \cdot \mu$ . Суммарный поток обслуживаний на отключения ЭП, даваемый  $k$  каналами, имеет интенсивность  $k \cdot \mu$ .

Теперь, зная все интенсивности, и воспользовавшись формулой из [4, 5] для финальных вероятностей рассматриваемой СМО, получим:

$$p_0 = \left[ 1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda^2}{(2 \cdot \mu^2)} + \frac{\lambda^3}{(2 \cdot 3 \cdot \mu^3)} + \dots + \frac{\lambda^k}{(k! \mu^k)} + \dots + \frac{\lambda^n}{(n! \mu^n)} \right]^{-1}. \quad (2)$$

В выражениях для  $p_1, \dots, p_n$ :

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu} p_0, \quad p_2 = \frac{\lambda^2}{2\mu^2} p_0, \dots, \quad p_k = \frac{\lambda^k}{k! \mu^k} p_0, \dots, \quad p_n = \frac{\lambda^n}{n! \mu^n}. \quad (3)$$

Введя обозначения  $\lambda/\mu = \rho$  для финальных вероятностей состояний, получают формулы Эрланга.

Определим  $P_{\text{отк}}$  – вероятность того, что пришедшая заявка получает отказ (в нашем случае, как уже отмечалось выше, это вероятность перегрузки кабеля). Для этого нужно, чтобы все  $n$  каналов были заняты, следовательно,

$$P_{\text{отк}} = p_n = \frac{\rho^n}{n!} p_0. \quad (4)$$

В [2] нахождение минимального сечения кабеля, через который получает питание  $m$  ЭП одинаковой мощности, производят в следующей последовательности:

1. Предполагается, что по известным законам распределения СВ,  $t_p$  и  $t_n$  и мощности ЭП определены  $S_{\text{min}}$  (метод определения  $S_{\text{min}}$ , предложенный в [2], в данной статье не рассматривается).

2. С помощью формулы (1) вычисляются значения  $\mu$  и  $\lambda$ . Исходными данными для вычисления этих параметров являются:  $m$  – общее число ЭП,  $T_c$  – продолжительность смены;  $t_{\text{ср}}$  – среднее время работы одного ЭП в течение смены.

3. Рассчитывается  $p_0$  по формуле (2), а значение  $\rho$  определяется из выражения  $\rho = \lambda/\mu$ ;

4. Задается значение  $P_{\text{отк}}$  и по формуле (4) вычисляется число каналов  $n$ .

5. Определяется сечение кабеля по формуле

$$S_{\text{каб}} = S_{\text{min}} \cdot n. \quad (5)$$

До сих пор, при изложении метода расчета сечения кабеля, предполагалось, что все  $m$  электроприемников имеют одинаковые мощности. В общем случае, когда ЭП имеют различные мощности, задача намного усложняется, и довести ее до явных аналитических зависимостей удастся лишь в редких случаях [5]. В этом случае, когда аналитические методы неприменимы, приходится прибегать к методам компьютерного моделирования.

В новой формулировке задачи по оценке сечения проводника, питающего группу электроприемников в терминологии теории массового обслуживания, термин *количество каналов (приборов)* связан с понятием *длительно допустимой плотности тока* и с

$$j_{д.д} = \frac{I_{д.д}}{S}, \quad [\text{А/мм}^2], \quad (6)$$

понятием *постоянного времени нагрева проводника*  $T_0$ , [мин].

В выражении (6)  $S$  - площадь поперечного сечения проводника.  $I_{д.д}$  - неизменная во времени длительно допустимая по условиям нагрева нагрузка, которая, в зависимости от условий прокладки для каждого сечения проводников, кабелей и шинопроводов, приводится в справочниках [6]. Для этих же элементов электрической сети, в указании по расчету электрических нагрузок, приводятся постоянные времена нагрева [6, 7].

Исследования показали, что постоянная времени нагрева подчиняется более сложным законам. Например, для открыто проложенных проводов с резиновой изоляцией,  $T_0$  изменяется в зависимости от сечения проводника [6].

Опираясь на вышеприведенные сведения, поясним смысл *количество каналов (приборов)* для рассматриваемой задачи.

Допустим, что все  $N$  ЭП, приведенные на рис. 2, постоянно включены в сеть и потребляют неизменный по времени суммарный ток  $I_{\Sigma} = \sum_1^N I_k(t)$ . Тогда величина плотности тока в проводнике, питающий СП, равна  $j = I_{\Sigma}/S$ , где  $S$  - площадь поперечного сечения проводника. Если рассчитанная плотность тока  $j$  равна *длительно допустимой плотности тока*  $j_{д.д}$  (6), соответствующей питающему СП проводнику, то значит, все каналы обслуживания СМО задействованы, и проводник работает без перегрузки.

Если режимы работы ЭП (рис.2) стохастичны, т.е. ЭП включаются и отключаются случайным образом, то справедливо неравенство  $j \leq j_{д.д}$ . Учитывая маловероятность одновременного включения всех ЭП и значения постоянного времени нагрева проводника, можно считать  $j < j_{д.д}$ . Следовательно, не все каналы обслуживания СМО (проводника) задействованы, значит можно уменьшить сечение проводника до значения, чтобы соблюдалось равенство  $j = j_{д.д}$ , соответствующее уменьшенному сечению проводника. При корректировке сечения проводника, необходимо учитывать его постоянную времени нагрева.

### **Компьютерное моделирование работы СМО в среде LabVIEW.**

Компьютерную модель СМО (система трех ЭП) построим на примере работы трех ЭП, которые связаны технологически и представляют собой транспортёр 1 и обрабатывающие станки 4 и 6 (рис. 4). Первым ЭП является электродвигатель транспортера 1, с помощью которого детали 2 поступают в накопитель 3 станка 4, т.е. образуется первая очередь деталей для дальнейшей обработки. После первичной механической обработки на станке 4, обработанные детали поступают в накопитель 5

станка 6, образуя вторую очередь. Далее, после вторичной обработки на станке 6 готовые изделия поступают в накопитель готовой продукции 7.

ЭП получают питание от СП 8 с помощью проводников 9.

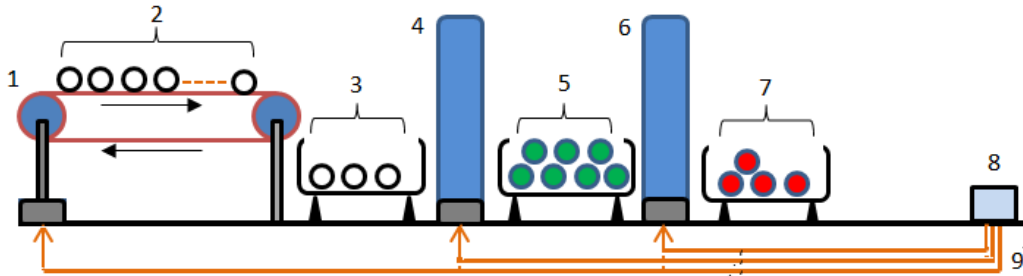


Рисунок 4 – Схематичное представление производственного участка цеха по механической обработке деталей

На рассматриваемом этапе, поставленная задача заключается в том, чтобы изучить влияние времени обработки деталей, которые являются случайными величинами, на возможности возникновения очередей из деталей на обработку. Трудностей с подбором сечений проводников в данной конкретной задаче не возникает.

Поставленная задача решена с помощью моделирования производственного процесса в графической среде LabVIEW, при этом программирование производится в двух окнах, называемых: Block Diagram (блок-диаграмма) (рис. 9, а), Front Panel (лицевая панель) (рис. 9, б). На лицевой панели разрабатывается внешний вид, а на блок-диаграмме – исходный код будущего виртуального прибора [8].

Создание программы на графическом языке G проведем в следующей последовательности [9]: создаем прибор инициализирующий очередь (рис. 5), с этой целью на функциональной панели выберем **Programming>Synchronization>Queue Operation>Obtain Queue**. Воспользовавшись инструментом **Connect Wire** (катушка) из **Tools Palette**, выбрав пункт **create>control** на верхнем входе прибора (max queue size), создаем элемент управления.

Этот управляющий элемент также появится на интерфейсной панели, с помощью него будем задавать количество деталей в единице времени, поступающих в накопитель первого станка. Далее, присваивается очереди имя – с этой целью щелкнем правой кнопкой мыши на вход прибора **name**, после выбираем пункт создания константы **create>constant**, и в появившемся окошке введем имя очереди, например, 1.

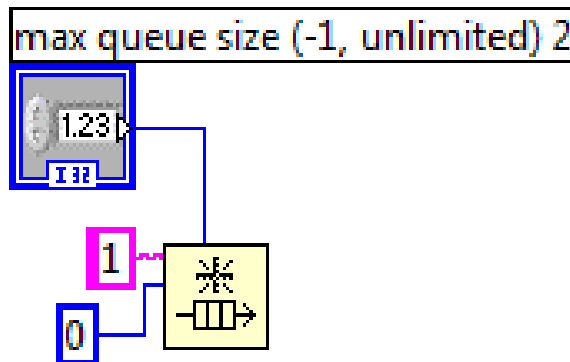


Рисунок 5 – Инициализация очереди

Далее, необходимо определиться с типом данных элементов, которые должны содержать очередь. Для этого выберем **Programming>Numeric>Numeric Constant** (по умолчанию стоит «0») и подключим его к входу **element data type**. В результате получим прибор, показанный на рис. 5, что означает завершение инициализации очереди.

Следующим этапом надо определить порядок поступления деталей в очередь.

Установим прибор **Programming>Synchronization>Queue Operation>Enqueue Element**, и с помощью катушки соединяем выходы **queue out** и **error out** из прибора **Obtain queue** к соответствующим входам прибора **Enqueue Element**. Так как деталь не одна, необходима циклическая работа программы. Выберем из функциональной панели **programming>structures>For Loop** и выделим с помощью левой кнопки мыши прибор **Enqueue Element**. Чтобы детали поступали в очередь по одной, перетянем «увеличение на 1» **Programming>Numeric>increment**. К входу  $x$  подключаем значок «итерация цикла», а выход  $(x + 1)$  пиктограммы подключаем к входу **Element** прибора **Enqueue Element**. Пусть каждая деталь поступает на обработку в накопитель станка №1 через случайно изменяющееся модельное время в секундах, лежащее в заданном интервале  $(a_1 - b_1)$ . Для этого установим в цикл задержку. Выберем **Programming>Timing>Wait (ms)** и перетянем данную иконку в цикл. Создаем для нее подпрограмму, генерирующую случайную величину с заданным законом распределения, соответствующую этой задержке. Чтобы количество итераций цикла было равно количеству деталей, поступающих на обработку, соединяем выход управляющего элемента **Numeric Control** с пиктограммой  $N$ , как показано на рис. 6.

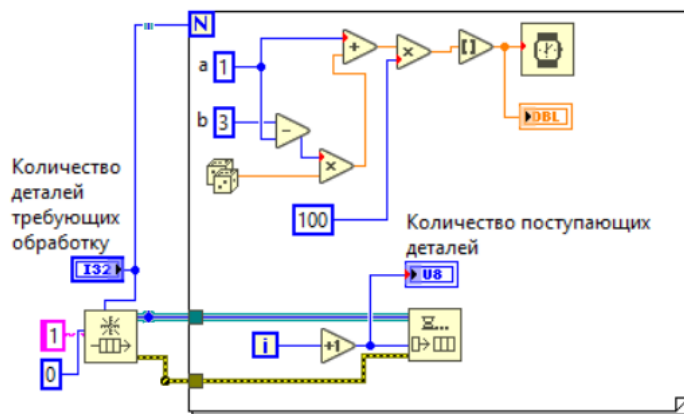


Рисунок 6 – Добавление элементов в очередь

В производственном участке цеха по механической обработке деталей имеется станок №1, через который проходит каждая деталь для первичной обработки. Чтобы установить этот станок, для начала установим цикл **While Loop, programming>structures>While Loop**. Для прочитывания элементов из очереди, то есть обработки деталей, поместим в цикл **While Loop** прибор **Dequeue Element, Programming>Synchronization>Queue Operation>Dequeue Element**. Чтобы видеть, сколько обработано деталей, создаем соответствующий индикатор для прибора **Dequeue Element** – правой кнопкой мыши щелкнем на выходе прибора **Element** и выберем пункт **constant>indicator**. С помощью инструмента **Edit Text** из панели инструментов, поменяем имя индикатора на «Обработано деталей». Установим время обработки деталей первым станком с помощью прибора задержки **Wait (ms)**, и присоединим этому прибору результат работы подпрограммы, моделирующей случайную величину, эквивалентную длительности обработки детали первым станком. Нажмите правой кнопкой мыши на иконку условия выхода из цикла (красная

пиктограмма в нижнем правом углу цикла), и в выпадающем меню выберите пункт создания константы, по умолчанию стоит F-«false», то есть цикл будет работать без остановки. Соединяем только что созданный прибор с ранее созданной очередью, как показано на рис. 7.

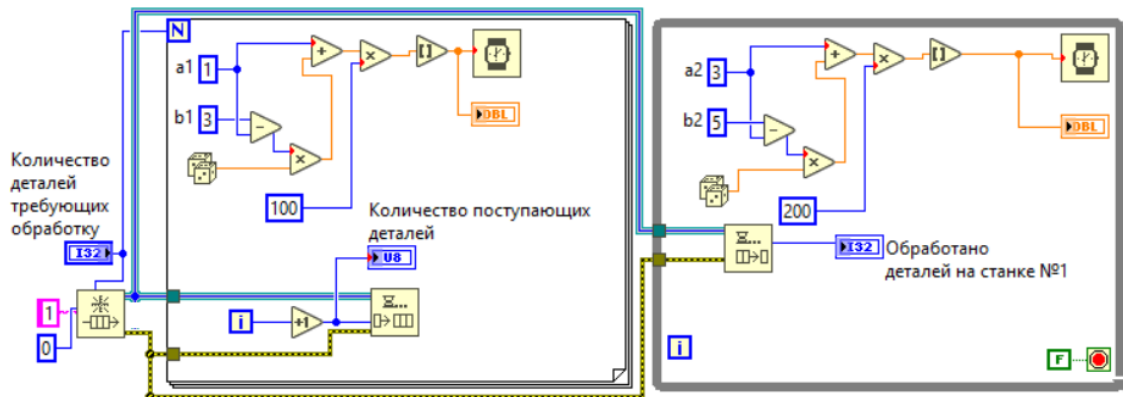


Рисунок 7 – Чтение из очереди

Чтобы видеть, сколько деталей в данный момент находится в обработке, воспользуемся прибором **Get Queue Status, Programming>Synchronization>Queue Operation>Get Queue Status**. Поместим его в цикл **While Loop** и соединим с очередью. Щелкнем правой кнопкой мыши на левый вход **Return Elements? (F)** прибора **Get Queue Status** и выберем пункт **Create>Constant. Return Elements?** – отображает, возвращены ли элементы в очередь.

По умолчанию, установлено значение false – функция не будет возвращать элементы в очередь. Чтобы поменять значение на true, выберем инструмент **Operate Value** из панели инструментов, и щелкнем левой кнопкой мыши на соответствующей пиктограмме. Для выходов **Elements** и **# Elements in queue**, которые находятся снизу у прибора **Get Queue Status**, создаем индикаторы, как показано на рис. 8.

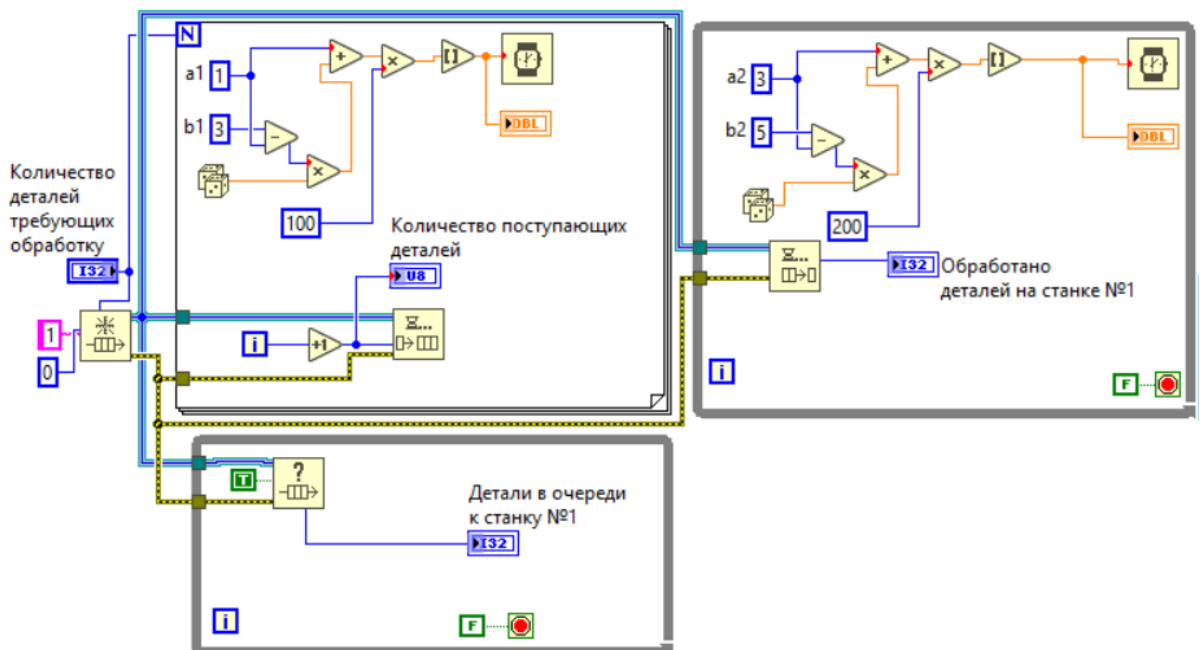


Рисунок 8 – Количество элементов в очереди



После того, как деталь получила первичную обработку на станке №1 со случайной длительностью, деталь поступает в накопитель станка №2, т.е. образуется очередь на обслуживание, если этот станок занят.

Аналогично первой, создаем вторую очередь и присваиваем ей имя, например, 2. Поместим прибор **Enqueue Element** в цикл **While Loop** с **Dequeue Element**. Подключаем выход **Element** прибора **Dequeue Element** к входу **Element** прибора **Enqueue Element** – то есть детали, обработанные первым станком, становятся в очередь к станку №2. Создаем цикл с **Dequeue Element**, такой же, как для первой очереди, и подключаем его ко второй очереди. Чтобы видеть, сколько деталей находится в данный момент в очереди на обработку к станку №2, создаем точно такой же цикл с **Get Queue Status**, как и в первой очереди, и подключаем его ко второй очереди.

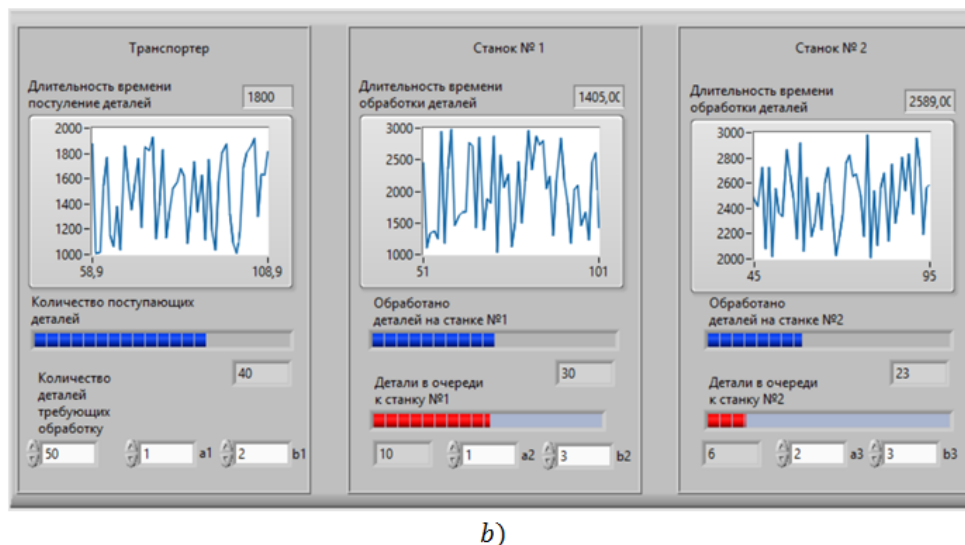
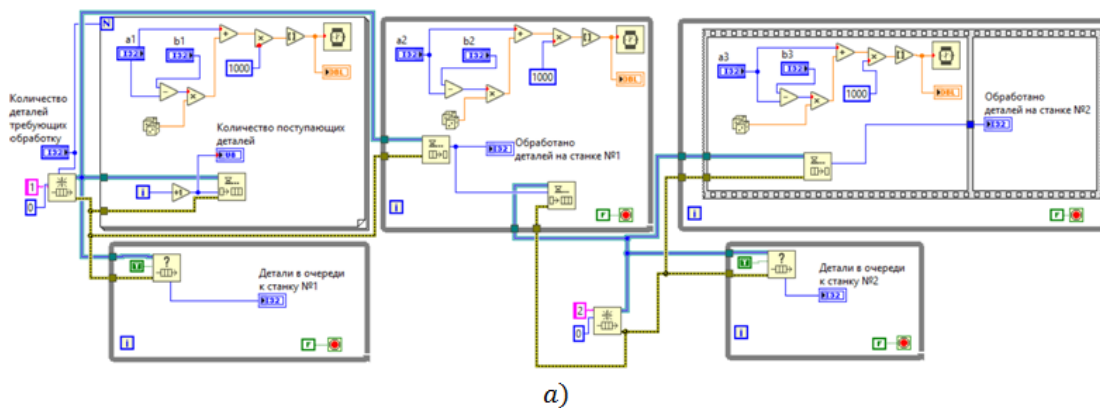


Рисунок 9 – а - модель СМО; б - передняя панель (интерфейс программы)

В цикле с **Dequeue Element** необходима последовательность действий для правильной работы. Выберем **Programming>Structure>Flat Sequence**, поместим прибор **Dequeue Element** и прибор **Wait (ms)** внутрь **Flat Sequence**. Щелкнем на границе **Flat Sequence** правой кнопкой мыши, выберем **Add Frame** и поместим во второй фрейм индикатор «*обработано деталей*». В результате получим программу, как показано на рисунке 9.

На интерфейсной (передней) панели выделены три секции, относящиеся к трем ЭП, где представлены графические индикаторы на экранах, на которых изображаются

графики зависимостей времени обработки деталей в виде случайных величин, т.е. показаны длительности времени: на первом - поступление деталей; на втором - обработка деталей первым станком; на третьем - обработка деталей вторым станком. На интерфейсной панели также распределены по секциям и цифровые индикаторы, показывающие количество поступающих на обработку деталей (1 - секция); количество обработанных деталей (1, 2 секции); количество деталей, находящихся в очереди на обработку (2, 3 - секции). Кроме того, на этой панели представлены и управляющие элементы, с помощью которых устанавливаются: количество деталей, требующих обработки; границы  $(a_1, b_1)$ ;  $(a_2, b_2)$ ;  $(a_3, b_3)$ , в пределах которых случайно изменяются время поступления деталей на обработку, продолжительность обработки, соответственно, первым и вторым станками.

Проверим программу на работоспособность. Для этого установим выше отмеченные границы  $(a_1 = 1, b_1 = 2)$ ;  $(a_2 = 1, b_2 = 3)$ ;  $(a_3 = 2, b_3 = 3)$ , зададимся необходимым количеством деталей, требующих обработки, например  $N = 50$ .

На рис. 9, *b* показано текущее состояние движения деталей в момент приостановки процесса моделирования. В этот момент времени, из 50-ти требующих обработки деталей, поступили в первый накопитель - 40 деталей, из них 30 деталей прошли первичную обработку на станке №1, а 10 деталей находятся в очереди в накопителе первого станка. Из 30 деталей, прошедших первичную обработку, 23 прошли вторичную обработку, 6 деталей находятся в накопителе второго станка в очереди, а 1 деталь обрабатывается на станке №2.

**Заключение.** По результатам моделирования, можно прийти к следующему – если за ту продолжительность времени, когда мы остановили процесс моделирования, необходимо было по плану завершить процесс обработки всего планируемого ( $N = 50$ ) количества деталей, и реально этого события не произошло, то возникает перед технологами вопрос, как реализовать за этот промежуток времени план обработки всех 50 деталей. Возможны следующие варианты решения задачи:

1. Качественно изменить технологию обработки данных деталей, чтобы сократить продолжительность обработки, что требует поиска инновационных решений, требующих длительного времени. При срочности решения задачи, этот вариант остается для перспективного планирования.

2. Дополнительно установить обрабатывающие станки, выполняющие технологические операции параллельно. Такое решение возможно при изменении электрической схемы питающей сети с выбором необходимых сечений проводников.

Разработанный виртуальный прибор (ВП), на данном этапе завершенности, позволяет исследовать влияние длительности технологических операций на возможности появления очередей из деталей, требующих обработки, с учетом того, что эти величины случайны, с присущими им законами распределения.

Авторами ведутся работы на расширение функциональных возможностей ВП, заключающиеся в том, чтобы разработать сетевую модель СМО с использованием возможностей вычислительной сети Петри [10, 11].

Предполагается, что расширенный вариант ВП позволит выбирать сечения питающих проводников, являющийся в понятиях СМО обслуживающим прибором, с учетом вышевведенного понятия каналов обслуживания для проводника и рассчитывать потери мощности и электроэнергии в электрической сети.

### Литература

1. Степанов В.П. Динамические модели и методы расчета характеристик графиков электрической нагрузки иерархически-структурных систем электроснабжения / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Московский энергетический институт. 1999г.
2. Аль Хакам Арфан, К.А. Сатаркулов Применение элементов теории массового обслуживания в задачах определения технических характеристик элементов электрических сетей. / Наука и новые технологии №1- 1998. С. 85-89.
3. Воробьев В.А. Описание распределения электрических нагрузок объекта уравнением Пуассона. / Электричество. № 9, 1987. С. 50-51.
4. Плескунов М. А. Теория массового обслуживания : учебное пособие / М. А. Плескунов; М<sup>о</sup>во науки и высшего образования РФ, Урал. федер. ун-т. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. — 264 с.
5. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Наука, 1988.
6. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
7. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Сатаркулов К., Такырбашев Б.К., Яблочников А.М. [Применение LabVIEW для решения задач мониторинга частоты в переходных режимах работы электрической сети](#) / [Проблемы автоматизации и управления](#). 2015. № 1 (28). С. 46-51
9. Построение СМО в LabVIEW / <https://poisk-ru.ru/s38931t18.html> (Дата обращения 30.04.2023).
10. М.С. Асанов. Структурная модель вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. // Известия КГТУ. – 2008. – №13. – С. 78-85.
11. М.С. Асанов. Вычислительные компоненты, язык описания и правила функционирования вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. // Известия КГТУ. – 2008. – №13. – С. 85-95.