



# ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАТТЕРНОВЫХ СЕТЕЙ

УДК 004.051

## **ДОРОГАНЬ Ольга Игоревна**

аспирант кафедры теоретической электротехники и электронных систем,  
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова.

**Научные интересы:** информационное обеспечение электроэнергетических систем,  
имитационное моделирование в электроэнергетике.

## **РЯБЕНЬКИЙ Владимир Михайлович**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники и электронных систем,  
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова.

**Научные интересы:** автоматизация электроэнергетических систем, компьютеризированные системы управления.

## **УШКАРЕНКО Александр Олегович**

к.т.н., доцент кафедры теоретической электротехники и электронных систем,  
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова.

**Научные интересы:** автоматизация электроэнергетических систем,  
информационное обеспечение электроэнергетических систем.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современные системы управления судовыми электроэнергетическими установками (СЭУ) являются иерархическими системами, в которых функции управления распределены между тремя соподчиненными вертикальными уровнями:

— первый уровень (нижний) включает в себя локальные системы управления генераторными агрегатами и исполнительными механизмами, устройства первичной обработки аналоговых и дискретных сигналов;

— второй уровень (средний) служит для решения задач координации взаимодействия силовых агрегатов и оптимизации их использования; к данному уровню относятся программируемые логические контроллеры, контроллеры автоматизации, системы синхронизации и распределения нагрузок между параллельно работающими генераторными агрегатами (в работе рассмотрены СЭУ с дизель-генераторными агрегатами (ДГА));

— третий уровень (верхний) включает в себя алгоритмы управления электростанцией в целом и информационную поддержку оператора и представлен компьютером со специализированным программным обеспечением (КСУ).

Система управления СЭУ относится к системам управления реального времени, поэтому еще на этапе проектирования одним из необходимых действий является расчет ее временной эффективности. В рассматриваемой трехуровневой системе управления временные задержки, связанные с информационным обеспечением и реализацией действий оператора, можно рассматривать как результат наложения нескольких факторов: длительность обработки аналоговых и дискретных сигналов подсистемами нижнего уровня и передача полученных данных подсистемам среднего уровня, обработка данных средствами среднего уровня и последующий информационный обмен с КСУ. Согласно принципам построения иерархических систем управления с повышением уровня иерархии

возрастает степень неопределенности информации о состоянии системы и, следовательно, увеличивается период формирования управляющих воздействий [1]. Кроме того, поскольку информационная связь КСУ со средствами автоматизации среднего уровня представляет собой логическую структуру сети «один ко многим», реализованную в виде топологии «общая шина», наибольший вклад в длительность временных задержек будут вносить факторы, связанные с передачей данных по сети: ограничения скорости передачи данных, расстояния между устройствами и КСУ и загруженность канала связи. В работах [2, 3] приведено, что наиболее существенные задержки (на несколько порядков превышающие остальные) при топологии «общая шина» с ведущим устройством обусловлены загруженностью канала связи.

### ЦЕЛЬ

Целью работы является создание алгоритма анализа зависимости временных характеристик системы управления от топологии СЭУ, который даст возможность не только оценить необходимость разделения информационного канала системы управления на несколько независимых каналов, но и формализовать процесс разделения, упрощая итеративные действия по расчету временных характеристик.

### ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Задачами КСУ являются мониторинг параметров судовой сети и ДГА, защита силовых агрегатов, управление синхронизацией ДГА с сетью и распределение нагрузок между параллельно работающими дизель-генераторами, изменение по требованию оператора и мониторинг состояний автоматических выключателей. Согласно нормативным документам [4, 5] мониторинг электрических параметров должен включать помимо отображения частот тока, действующих значений напряжений и токов, мощностей, отдаваемых дизель-генераторами на общую нагрузку и обновляемых с интервалом 15-20 с., отображение мгновенных значений соответствующих напряжений и токов по запросу оператора. Защита ДГА включает в себя защиты от обратной мощности, потери возбуждения и перегрузки, которые должны срабатывать в течение 5-15 с. после выхода определенных электрических параметров за

допустимые пределы. Поэтому мониторинг параметров, необходимых для реализации функций защит, должен происходить с интервалом не более  $(5-15)/2$  с. Управление синхронизацией (изменение уставок устройства) и состояниями автоматических выключателей должно осуществляться после выполнения соответствующих действий оператора с минимальной временной задержкой, не превышающей 30 с. Анализируя приведенные положения, процессы в КСУ, требующие обмена данными с устройствами нижележащих уровней системы управления, по характеру периодичности можно условно разделить на три группы:

1) мониторинг параметров сети и ДГА, состояний автоматических выключателей с детерминированным временным интервалом (по величине не превышающим минимальное из времен, необходимых для реализации функций защит ДГА);

2) мониторинг параметров ДГА, управление устройствами синхронизации и изменение состояний автоматических выключателей по запросу оператора;

3) срабатывание функций защит ДГА и формирование сигналов на изменение нагрузки дизель-генератора.

Согласно принципам объектно- и функционально-ориентированного программирования на уровне программного обеспечения (ПО) КСУ реализация действий, связанных с определенным аспектом объекта управления, инкапсулируется в отдельном компоненте ПО (например, компоненты «ДГА», «Защита ДГА» и др.). Тогда функционирование вышеприведенных процессов можно рассматривать как обработку заявок от компонентов ПО, для обслуживания которых используется механизм обмена пакетами данных между КСУ и микропроцессорными системами управления силовыми агрегатами. Используя приведенное группирование процессов обмена данными, поток заявок можно рассматривать как объединение детерминированного потока, связанного с действиями первой группы, и двух случайных, связанных с действиями второй и третьей групп, причем при корректно настроенной системе управления и исправных силовых агрегатах поток заявок от компонентов, связанных с обеспечением действий третьей группы, будет отсутствовать.

Процесс обслуживания каждой заявки от компонента состоит в передаче пакета информационно-

управляющих данных определенной микропроцессорной системе и получении ответного пакета с последующей его передачей запрашивающему компоненту. Поскольку для используемых интерфейса и протокола (RS-485, Modbus RTU) размеры пакетов данных строго регламентированы, а скорость информационного обмена одинакова для всех устройств, то время обслуживания каждой заявки детерминированно и, в общем случае, различно для разных заявок.

Таким образом, управление и мониторинг параметров СЭУ посредством взаимодействия компонентов ПО с микропроцессорными средствами автоматизации можно рассматривать как замкнутую одноканальную систему массового обслуживания (СМО) со входным потоком заявок, полученным объединением случайного и детерминированного потоков, и детерминированным временем обслуживания ( $\bar{G} \cup \bar{D} | \bar{D} | 1$ ).

Система управления СЭУ относится к классу систем управления в режиме реального времени, причем реакция системы на возникновение внешних воздействий определяется временем обработки очереди заявок СМО. Взаимодействие оператора с ПО КСУ происходит посредством использования визуальных метафор объектов управления и средств автоматизации (графических изображений компонентов ПО), объединенных в мнемосхему конкретной электроэнергетической установки. Поэтому для расчета времени обслуживания заявок от соответствующих визуальным метафорам компонентов конкретной мнемосхемы необходимо формализовать процесс регистрации этих компонентов, определения их вклада в результирующий входной поток СМО и времени обработки очереди.

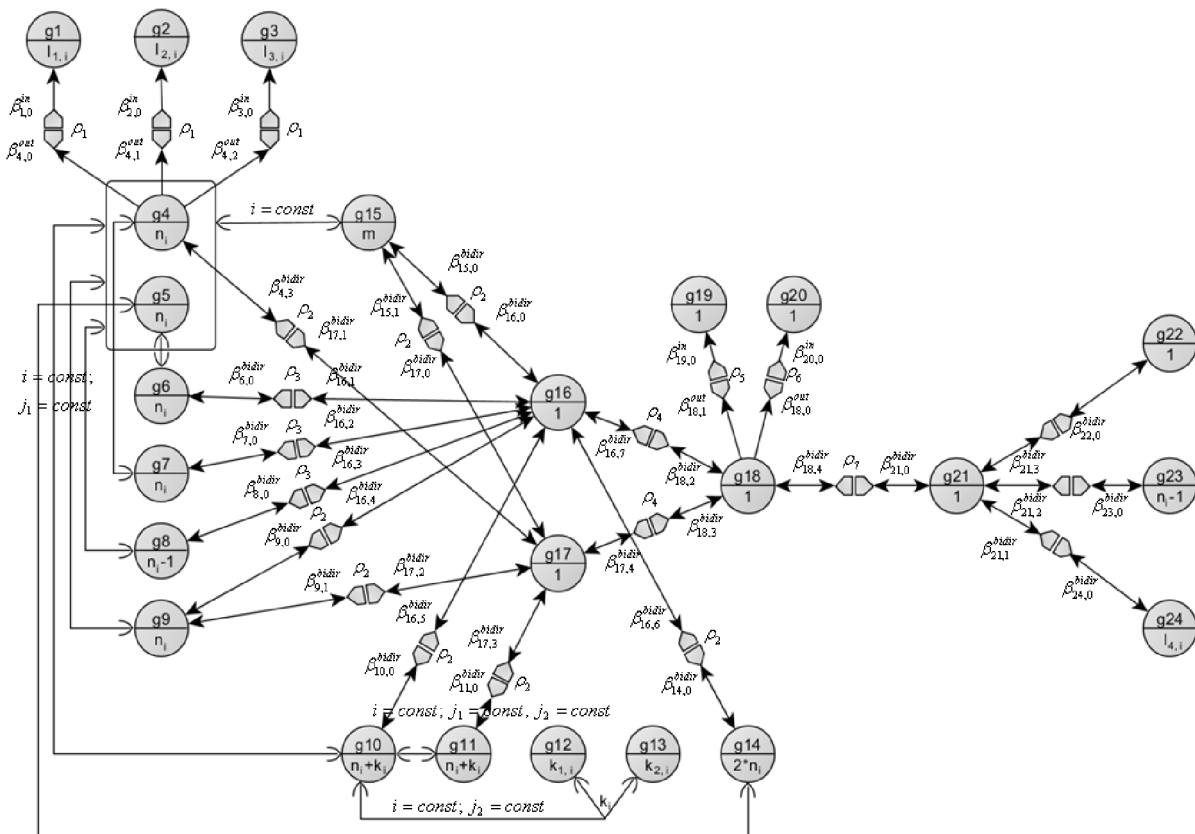


Рисунок 1 – Структура программного обеспечения КСУ в виде паттерновой сети

В состав электростанции в общем случае входят  $m$  секций по:

-  $n_i$  ( $i \in [1, m]$ ) блоков ДГА, защит ДГА, средств отображения параметров дизеля и генератора;

- $n_i - 1$  блоков контроля и управления процессом синхронизации ДГА с шинами ГРЩ;
- $2 \cdot n_i$  импульсных кнопок управления состоянием дизеля;
- $k_i$  асинхронных двигателей и нагрузок;
- $n_i + k_i$  автоматических выключателей и светодиодов для индикации их состояния;
- 1 устройству распределения нагрузок между параллельно работающими ДГА.

Поскольку каждому из перечисленных объектов соответствует определенный компонент (объект соответствующего класса) ПО, в работе для расчета временных характеристик СМО предложено использовать диаграмму классов ПО в виде паттерновой сети [6] (рис. 1), в которой:

- образующие  $g1 - g3$  служат для обозначения компонентов индикации измеренных электрических параметров; с каждым ДГА может быть связано произвольное, но конечное, число таких блоков (обозначены как  $l_1, l_2$  и  $l_3$  соответственно);

- образующие  $g4 - g15$  представляют объекты классов, реализующих визуальные метафоры составляющих СЭУ: Генератор, Дизель (совместно с блоком Генератора образует блок ДГА), диалоговое окно «Параметры дизеля», диалоговое окно «Осциллограммы», Система синхронизации, Защита ГА, Автоматический выключатель, Светодиодная арматура, Нагрузка, Асинхронный двигатель, Кнопка управления, Система распределения нагрузок (активных и реактивных) соответственно;

- образующие  $g16$  и  $g17$  отвечают за формирование очередей переменной (случайной) и постоянной длин соответственно,  $g18$  – за объединение обеих очередей;

- образующие  $g19$  и  $g20$  отражают объекты, осуществляющие накопление и статистическую обработку данных об информационных потоках в системе и режимах работы силовых агрегатов;

- образующая  $g21$  – ПО устройства, осуществляющего физический обмен данными;

- образующие  $g22 - g24$  представляют интерфейсы микропроцессорных средств автоматизации;

- отношения связи  $\rho_3 - \rho_8$  – формализованные средства отображения межкомпонентных связей, кото-

рые далее могут быть использованы для различения влияний компонентов определенного типа на время обслуживания очереди;

- переменные  $l_j, n_i, k_i$  и числа 1, приведенные в нижних полукругах изображений образующих, отражают статические мощности отношений между соответствующими объектами.

Дополнительным требованием к реализуемому алгоритму регистрации источников заявок СМО и расчета времени обслуживания является наличие возможности формальной реорганизации структуры системы управления (в частности разделения канала обслуживания на несколько независимых) при неудовлетворительных результатах расчета временных характеристик СМО. Тогда, учитывая наличие неразрывной логической связи между блоками

1) Генераторов, Дизелей, диалоговых окон для отображения параметров дизеля и генератора, Защит ДГА, Систем синхронизации, Кнопок управления состоянием дизеля, генераторных выключателей (представленных компонентом Автоматический выключатель) и Светодиодов-индикаторов состояний генераторных выключателей (на рис. 1 логические связи обозначены закругленными стрелками; данная связь соответствует  $i = const, j_1 = const (j_1 \in [1, n_i])$ );

2) Нагрузки и Асинхронных двигателей и Автоматических выключателей со Светодиодами-индикаторами их состояний ( $i = const, j_2 = const (j_2 \in [1, k_i])$ )

и условно неразрывной связи между приведенными группами, структуру программного обеспечения для компьютера для каждой секции ( $i = const$ ) можно записать в виде подкомплекта:

$$G^i = G_1^i + G_2^i + G_0^i, \quad (1)$$

где

$$G_1^i = \left\{ [g1]^{l_1}, [g2]^{l_2}, [g3]^{l_3}, [g4]^{n_i}, [g5]^{n_i}, [g6]^{n_i}, [g7]^{n_i}, [g8]^{n_i-1}, \right. \quad (2)$$

$$\left. [g9]^{n_i}, [g10]^{n_i}, [g11]^{n_i}, [g14]^{2 \cdot n_i}, [g15]^1 \right\},$$

$$G_2^i = \left\{ [g12]^{k_i}, [g13]^{k_i}, [g10]^{k_i}, [g11]^{k_i} \right\}, \quad (3)$$

$$G_0^i = \{ [g16]^1, [g17]^1, [g18]^1, [g19]^1, [g20]^1 \} \quad (4)$$

и обозначение  $[g1^i]$  является сокращенной записью обозначения количества экземпляров в подкомплекте ( $I_1^i = \#(g1, G_1^i)$ ), структуру всего программного обеспечения для управления электростанцией можно описать в виде комплекта, образованного суммой суммы подкомплектов  $G_1^i$  и  $G_2^i$  и пересечения подкомплектов  $G_0^i$  каждой секции:

$$G = \sum_{i=1}^m (G_1^i + G_2^i) + \bigcap_{i=1}^m G_0^i \quad (5)$$

Далее можно провести расчет временных характеристик СМО, связанной с подкомплексом каждой  $i$ -той секции, и только потом – для комплекта ПО с мнемосхемой всей СЭУ. Подобный подход позволит с наименьшими временными затратами производить итеративные расчеты при необходимости разделения канала обслуживания СМО.

Согласно дискретной теории паттернов каждой образующей соответствует определенная арность, которую в данном контексте можно интерпретировать как максимальное количество установленных в каждый момент времени информационных связей с другими компонентами. Так, с  $j$ -тым ДГА в  $i$ -той секции может быть связано  $I_1^{i,j_1}$  Текстовых полей,  $I_2^{i,j_1}$  Шкальных и  $I_3^{i,j_1}$  Стрелочных индикаторов, при этом отношение связи  $\rho_1$  является отношением «один ко многим», т.е. образующая  $g4$  может быть связана с произвольным, но конечным, числом образующих  $g1 - g3$ , а образующие  $g1 - g3$  только с одной  $g4$ . Отсюда арности  $g1 - g3$  равны единице:

$$\omega(g1^{i,j_1}) = \omega(g2^{i,j_1}) = \omega(g3^{i,j_1}) = 1, \quad (6)$$

что соответствует принципу реализма: каждый блок индикации отображает данные, получаемые лишь от одного блока ДГА, в то время как эти данные (электрические параметры генератора) могут быть отображены в различных комбинациях с помощью различных средств индикации. Сам же блок генераторного агрега-

та помимо связей с  $\sum_{p=1}^3 I_p^{i,j_1}$  блоками индикации должен поддерживать информационную связь со средствами автоматизации, что осуществляется посредством блока формирования очередей и на рис. 1 отображено в виде отношения связи  $\rho_2$  – множественного включения (отношения «многие к одному») – между образующими  $g4$  и  $g17$ : для каждого  $j_1$ -ого ДГА в  $i$ -той секции выполняется опрос значений электрических параметров генератора. Отсюда следует арность  $g4$ :

$$\omega(g4^{i,j_1}) = \sum_{p=1}^3 I_p^{i,j_1} + 1 \quad (7)$$

Аналогично арности образующих  $g9 - g11, g14 - g15$ :

$$\begin{aligned} \omega(g10^{i,j_1}) &= \omega(g11^{i,j_1}) = \omega(g14^{i,j_1}) = 1; \\ \omega(g9^{i,j_1}) &= \omega(g15^{i,j_1}) = 2 \end{aligned} \quad (8)$$

Отношение связи  $\rho_3$  – отношение «один из многих к одному» означает возможность наличия связи в каждый момент времени только одного из множества экземпляров соответствующей образующей с другой образующей. Например, связь  $\beta_{6,0} \rho_3 \beta_{16,1}$  расшифровывается как из  $n_i$ -того количества блоков «Параметры дизеля» (образующая  $g6$ ) в каждый момент времени только один может участвовать в обмене данными со средствами автоматизации посредством связи с блоком формирования очередей переменной длины (образующая  $g16$ ). Таким образом, арности образующих  $g16$  и  $g17$  рассчитываются как:

$$\begin{aligned} \omega(g16^i) &= 4 + 4 \cdot n_i + k_i, \\ \omega(g17^i) &= 1 + 3 \cdot n_i + k_i \end{aligned} \quad (9)$$

т.е. арность связей для отношений  $\rho_2$  равна мощности соответствующей образующей в  $i$ -том подкомплекте, а для отношений  $\rho_3$  – единице.

Образующая  $g18$  является объединяющей по отношению к образующим, отражающим формирование очередей постоянной и переменной длин ( $g16$  и  $g17$ ), и

отвечает за формирование конечных очередей запросов и ответов для организации обмена данными по физическому каналу связи. Поскольку через нее проходит вся информация о параметрах электроэнергии и состояниях автоматических выключателей, к функциям блока, представленного образующей  $g18$ , относится передача статистических данных об информационных потоках и параметров электроэнергии в базу данных соответствующим блокам (представленных образующими  $g19$  и  $g20$ ). Таким образом, отношения связи  $\rho_5$  и  $\rho_6$  являются «чисто» информационными отношениями «один к одному» без непосредственного обмена данными со средствами автоматизации, в то время как отношение  $\rho_4$  – отношение включения (также «один к одному») означает полное включение данных, полученных от одних образующих в другие. Связь программного обеспечения для компьютера с устройством, осуществляющим маршрутизацию пакетов данных, обозначена отношением  $\rho_7$ , и непосредственные

связи маршрутизатора с микропроцессорными системами – отношением  $\rho_8$ .

Таким образом, для расчета времени обслуживания заявок от компонентов ПО рассмотрению подлежат отношения связи  $\rho_2 - \rho_4$  и образующие, связанные посредством этих отношений. Поскольку одним из методов уменьшения времени обработки очереди заявок является увеличение скорости обмена данными, для расчета минимального, среднего и максимального значений времени можно использовать зависимость между длинами соответствующих очередей и скоростью и форматом обмена данными.

Тогда в качестве атрибутов образующих, связи которых могут образовывать соединения посредством отношений  $\rho_2 - \rho_4$ , можно использовать длины пакетов запроса и ожидаемого ответа (в байтах) для каждого соответствующего показателя связи. Из этого следуют вектора признаков образующих  $g4 - g18$  в виде:

$$\begin{aligned}
 a(g4^{i,j_1}) &= \left( 4, \gamma_{4,30}^{i,j_1}, \gamma_{4,31}^{i,j_1}, [\beta_{4,0}^{i,j_1}]^{l_1}, [\beta_{4,1}^{i,j_1}]^{l_2}, [\beta_{4,2}^{i,j_1}], \beta_{4,3}^{i,j_1} \right); \\
 a(gp^{i,j_1}) &= \left( p, \gamma_{p,00}^{i,j_1}, \gamma_{p,01}^{i,j_1}, \beta_{p,0}^{i,j_1} \right) \text{ для } p = \{ 6, 7, 8, 10, 11, 14 \}; \\
 a(gp^{i,j_1}) &= \left( p, \gamma_{p,00}^{i,j_1}, \gamma_{p,01}^{i,j_1}, \gamma_{p,10}^{i,j_1}, \gamma_{p,11}^{i,j_1}, \beta_{p,0}^{i,j_1}, \beta_{p,1}^{i,j_1} \right) \text{ для } p = \{ 9, 15 \}; \\
 a(gp^{i,j_1}) &= \left( p, \gamma_{p,00}^{i,j_1}, \gamma_{p,01}^{i,j_1}, \gamma_{p,10}^{i,j_1}, \gamma_{p,11}^{i,j_1}, \beta_{p,0}^{i,j_1}, \beta_{p,1}^{i,j_1} \right) \text{ для } p = \{ 9, 15 \}; \\
 a(g16^i) &= \left( 16, \gamma_{16,00}^i, \gamma_{16,01}^i, \left\{ [\gamma_{16,p0}^{i,j_1}]^{n_i}, [\gamma_{16,p1}^{i,j_1}]^{n_i} \mid p = \{ 1, 2, 4, 5 \} \right\}, \right. \\
 & \left. [\gamma_{16,30}^{i,j_1}]^{n_i-1}, [\gamma_{16,31}^{i,j_1}]^{n_i-1}, [\gamma_{16,50}^{i,j_1+j_2}]^{k_i}, [\gamma_{16,51}^{i,j_1+j_2}]^{k_i}, [\gamma_{16,60}^{i,j_1}]^{2n_i}, [\gamma_{16,61}^{i,j_1}]^{2n_i}, \gamma_{16,70}^i, \gamma_{16,71}^i, \right. \\
 & \left. \beta_{16,0}^i, \left\{ [\beta_{16,p}^{i,j_1}]^{n_i} \mid p = \{ 1, 2, 4, 5 \} \right\}, [\beta_{16,3}^{i,j_1}]^{n_i-1}, [\beta_{16,5}^{i,j_1}]^{k_i}, [\beta_{16,6}^{i,j_1}]^{2n_i}, \beta_{16,7}^i \right); \\
 a(g17^i) &= \left( 17, \gamma_{17,00}^i, \gamma_{17,01}^i, \left\{ [\gamma_{17,p0}^{i,j_1}]^{n_i}, [\gamma_{17,p1}^{i,j_1}]^{n_i} \mid p = \{ 1, 2, 3 \} \right\}, [\gamma_{17,30}^{i,j_1+j_2}]^{k_i}, \right. \\
 & \left. [\gamma_{17,31}^{i,j_1+j_2}]^{k_i}, \gamma_{17,40}^i, \gamma_{17,41}^i, \beta_{17,0}^i, \left\{ [\beta_{17,p0}^{i,j_1}]^{n_i} \mid p = \{ 1, 2, 3 \} \right\}, [\beta_{17,3}^{i,j_1+j_2}]^{k_i}, \beta_{17,4}^i \right); \\
 a(g18^i) &= \left( 18, \left\{ \gamma_{18,p0}^i, \gamma_{18,p1}^i \mid p = \{ 2, 3, 4 \} \right\}, \beta_{18,0}^i, \beta_{18,1}^i, \left\{ \beta_{18,p}^i \mid p = \{ 2, 3, 4 \} \right\} \right),
 \end{aligned} \tag{10}$$

где нижние индексы атрибутов образующих формируются путем добавления 0 к индексу соответствующей связи для обозначения длины запроса и 1 – для обозначения длины ожидаемого ответа; обозначение  $[\beta_{4,0}^{i,j_1}]^{l_1}$  яв-

ляется сокращенной записью обозначения количества экземпляров показателей связи в векторе. При этом атрибуты, соответствующие соединенным посредством отношений  $\rho_2 - \rho_4$  связям, равны между собой.

Двухсторонние связи (отмеченные на рис. 1 верхним индексом *bidir*) можно рассматривать как наложение входной и выходной связей. Тогда при формировании очередей запросов образующие  $g_{16} - g_{18}$  выполняют роли образующих синтеза (с выходными связями  $\beta_{16,7}$ ,  $\beta_{17,4}$  и  $\beta_{18,4}$  соответственно), а при передаче данных в обратном направлении – образующих анализа (со входными связями  $\beta_{16,7}$ ,  $\beta_{17,4}$  и  $\beta_{18,4}$ ). Если учесть, что  $g_{16}$  выполняет функции формирования очереди переменной длины,  $g_{17}$  – функции формирования очереди условно постоянной длины,  $g_{18}$  – функции формирования конечной очереди;  $\rho_2$  – отношение

связи «многие к одному»,  $\rho_3$  – отношение связи «один из многих к одному»,  $\rho_4$  – отношение связи «включение» и равенство атрибутов, соединенных отношениями связи  $\rho_2 - \rho_4$ , то минимальному, максимальному и среднему значениям длины очереди запросов СМО (в байтах; расчет значений сразу в байтах позволяет в дальнейшем не учитывать различия между заявками от компонентом) можно сопоставить значения атрибута  $\gamma_{18,40}$ , при расчете которых учитывать выполнение соответствующей определенному отношению и длине очереди операции (табл. 1).

Таблица 1.

Операции для расчета длин очереди

Отношение связи	Длина очереди / операция с атрибутами входящих связей		
	Максимальная	Минимальная	Средняя
$\rho_2$	сумма	для атрибутов образующей $g_{16}$ :	
		не учитываются (умножение на ноль)	сумма элементов вектора*
		для остальных атрибутов:	
		сумма	сумма
$\rho_3$	максимальное значение	не учитываются (умножение на ноль)	сумма элементов вектора
$\rho_4$	сумма	сумма	сумма

\* – вектор, полученный в результате произведения векторов атрибутов и соответствующих им интенсивностей запросов

Тогда, если обозначить операцию над множеством атрибутов связей, объединенных отношением  $\rho_2$ , и относящихся к образующей  $g_{16}$ , как  $func_1$ ; а операцию над множеством атрибутов связей, объединенных отношением  $\rho_3$  – как  $func_2$ , то для вычисления атрибутов, соответствующих выходным направлениям связей каждого подкомплекта, можно использовать следующие выражения:

– для подкомплекта, описывающего связанную с генерированием электроэнергии часть компонент  $i$ -той секции  $G_1^i$ :

$$\begin{aligned} \gamma_{16,70}^i |_{G_1^i} &= func_1 \{ \gamma_{15,00}^i \} + \\ &+ \sum_{p=6}^7 func_2 \{ \gamma_{p,00}^i | j_1 \in [1, n_i] \} + \\ &+ func_2 \{ \gamma_{8,00}^i | j_1 \in [1, n_i - 1] \} + \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{p=9}^{10} func_1 \{ \gamma_{p,00}^i | j_1 \in [1, n_i] \} + \\ &func_1 \{ \gamma_{14,00}^i | j_1 \in [1, 2 \cdot n_i] \} ; \\ \gamma_{17,40}^i |_{G_1^i} &= \gamma_{15,10}^i + \sum_{j_1=1}^{n_i} (\gamma_{4,30}^i + \gamma_{9,10}^i + \gamma_{11,00}^i) \end{aligned} \quad (12)$$

– для подкомплекта, описывающего связанную с потреблением электроэнергии часть компонент  $i$ -той секции  $G_2^i$ :

$$\gamma_{16,70}^i |_{G_2^i} = func_1 \{ \gamma_{10,00}^i | j_2 \in [1, k_i] \} ; \quad (13)$$

$$\gamma_{17,40}^i |_{G_2^i} = \sum_{j_2=1}^{k_i} \gamma_{11,00}^i |_{j_2=1} ; \quad (14)$$

– для подкомплекта, описывающего связанную с формированием очередей часть компонентов  $i$ -той секции  $G_0$ :

$$\gamma_{18,40}^i = \gamma_{16,70}^i + \gamma_{17,40}^i, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma_{16,70}^i &= \gamma_{16,70}^i \Big|_{G_1^i} + \gamma_{16,70}^i \Big|_{G_2^i}; \\ \gamma_{17,40}^i &= \gamma_{17,40}^i \Big|_{G_1^i} + \gamma_{17,40}^i \Big|_{G_2^i}. \end{aligned} \quad (16)$$

Тогда атрибуты для комплекта, соответствующего полной системе управления электростанцией, рассчитываются как:

$$\gamma_{18,40} = \sum_{i=1}^m (\gamma_{16,70}^i + \gamma_{17,40}^i) \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \gamma_{16,70}^i &= \sum_{i=1}^m \gamma_{16,70}^i \Big|_{G_2^i} + \text{func}_1 \{ \gamma_{15,00}^i \mid i \in [1, m] \} + \\ &+ \sum_{p=9}^{10} \text{func}_1 \{ \text{func}_1 \{ \gamma_{p,00}^{i,j_1} \mid j_1 \in [1, n_i] \} \mid i \in [1, m] \} + \\ &+ \text{func}_1 \{ \text{func}_1 \{ \gamma_{14,00}^{i,p} \mid p \in [1, 2 \cdot n_i] \} \mid i \in [1, m] \} \quad (18) \\ &+ \sum_{p=6}^7 \text{func}_2 \{ \text{func}_2 \{ \gamma_{p,00}^{i,j_1} \mid j_1 \in [1, n_i] \} \mid i \in [1, m] \} + \\ &+ \text{func}_2 \{ \text{func}_2 \{ \gamma_{8,00}^{i,j_1} \mid j_1 \in [1, n_i - 1] \} \mid i \in [1, m] \}; \\ \sum_{i=1}^m \gamma_{17,40}^i &= \sum_{i=1}^m \gamma_{17,40}^i \Big|_{G_1^i} + \sum_{i=1}^m \gamma_{17,40}^i \Big|_{G_2^i}, \quad (19) \end{aligned}$$

в которых:

– при вычислении значения атрибута  $\gamma_{18,40}$ , соответствующего минимальной длине очереди запросов ( $\gamma_{18,40}^{\min}$ ):

$$\begin{aligned} \text{func}_1 \{ \gamma_i \mid i \in [1, n_{\max}] \} &= \\ = \text{func}_2 \{ \gamma_i \mid i \in [1, n_{\max}] \} &= 0; \end{aligned} \quad (20)$$

– при вычислении значения атрибута  $\gamma_{18,40}$ , соответствующего максимальной длине очереди запросов ( $\gamma_{18,40}^{\max}$ ):

$$\text{func}_1 \{ \gamma_i \mid i \in [1, n_{\max}] \} = \sum_{i=1}^{n_{\max}} \gamma_i; \quad (21)$$

$$\text{func}_2 \{ \gamma_i \mid i \in [1, n_{\max}] \} = \max_{i \in [1, n_{\max}]} \gamma_i;$$

– при вычислении значения атрибута  $\gamma_{18,40}$ , соответствующего средней длине очереди запросов ( $\gamma_{18,40}^{\text{avg}}$ ):

$$\begin{aligned} \text{func}_1 \{ \gamma_i \mid i \in [1, n_{\max}] \} &= \\ = \text{func}_2 \{ \gamma_i \mid i \in [1, n_{\max}] \} &= \sum_{i=1}^{n_{\max}} (\gamma_i \cdot \lambda_i \cdot t_{\text{ск.ф.}}) \quad (22) \end{aligned}$$

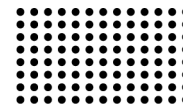
где из множества атрибутов связей  $\{ \gamma_i \mid i \in [1, n_{\max}] \}$  составляется вектор-строка  $\Gamma$ , а из интенсивностей запросов объектов программного обеспечения, соответствующих образующим с этими атрибутами связи, – вектор-столбец  $\Lambda$ ; результатом выполнения операций над множествами будет сумма элементов полученного в результате перемножения векторов ( $\Gamma \cdot \Lambda$ ) вектора;  $t_{\text{ск.ф.}}$  – выбранное пользователем время обработки запросов в очереди.

Для возможности регулирования временных характеристик системы в проектируемом программном обеспечении предлагается время обработки очереди запросов сделать настраиваемым. Поскольку СМО является системой с ожиданием, по формуле Литтла среднее число заявок от каждого из компонентов рассчитывается как произведение интенсивности потока и среднего времени пребывания заявки в системе (в данном случае – времени обработки очереди  $t_{\text{ск.ф.}}$ ).

Аналогичные формулам (11) – (22) выражения используются при вычислении минимального, максимального и среднего значений длины очереди ожидаемых ответов  $\gamma_{18,41}$ .

Обработка запроса от программного объекта состоит в передаче запроса аппаратным средствам автоматизации и приеме ответного пакета данных. Поскольку канал связи, используемый в системе, является полудуплексным, то длину очереди СМО (минималь-





ную, максимальную или среднюю) условно можно рассматривать как сумму атрибутов  $\gamma_{18,40}$  и  $\gamma_{18,41}$ :

$$L_{\min(\max, avg)} = \gamma_{18,40}^{\min(\max, avg)} + \gamma_{18,41}^{\min(\max, avg)} \quad (23)$$

Тогда для расчета времени обработки запросов всей очереди (минимального, максимального или среднего) можно использовать выражение:

$$t_{ck \min(\max, avg)} = \frac{L_{\min(\max, avg)} \cdot (8 + n_{ad})}{g} \quad (24)$$

где  $g$  – скорость обмена данными (бит/с);  $n_{ad}$  – количество служебных бит, приходящихся на байт данных.

### ВЫВОДЫ

Использование теории дискретных паттерновых сетей для описания взаимодействия объектов специа-

лизированного ПО позволяет за счет введения отношений связи выделить межобъектные связи, участвующие в формировании входного потока СМО, и далее для объектов, объединенных посредством выделенных связей, ввести атрибуты как длины сетевых пакетов данных. Выявление интерфейсно неделимых блоков мнемосхемы и их описание в виде комплектов соответствующих образующих дают возможность с помощью атрибутов этих образующих определить величины временных задержек для каждого из потенциальных каналов СМО, на основе которых производится дальнейший расчет временных характеристик проектируемой системы управления. При выявлении длительности временных задержек последней неудовлетворяющими требованиям нормативных документов оптимальное количество каналов и состав компонент-источников заявок СМО определяются исходя из известных на предыдущем этапе характеристик составляющих СМО.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Men'kov A.B. Teoreticheskiye osnovy avtomatizirovannogo upravleniya / A.V. Men'kov, V.A. Ostreykovskiy. Moskva: Onikas, 2005. 640 s.
2. Khazaei H. Accuracy Evaluation of Delivered Measurements to HMI in a Real SCADA Automation System / H. Khazaei, H. Sheisi, H. Moradmand // Instrumentation Control and Automation. – 2011. – P. 279–283.
3. Luque J. Determining the channel capacity in SCADA systems using polling protocols [power system telecontrol] / J. Luque, I. Gomez, I. Escudero // IEEE Transactions on Power Systems. – 1996. – №2 – P. 917–922.
4. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Tom 2. – Sankt-Peterburg: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2013. – 721 s.
5. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii morskikh i rechnykh sudov. Elektroborudovaniye. – Kiyev: Ministerstvo transporta Ukrainy, Gosudarstvennyy departament morskogo i rechnogo transporta, 1996 – 111 s.
6. Kovalenko I.I. Patternovyye seti i ikh primeneniye : uchebnoye posobiye / I.I. Kovalenko, V.M. Ryaben'kiy, O.A.Kudin. – Nikolayev: Ilion, 2010. – 68 s.