

УДК: 519.711.3+519.715+621.395.72

# Теоретико-множественная модель для решения задачи системного анализа и синтеза в телекоммуникациях

В. Р. Губкина

Рассматривается теоретико-множественная модель для решения задачи системного анализа и синтеза в сложной нелинейной системе с учетом входных параметров, требований к выходным характеристикам, вариативности построения архитектур системы, внешних деструктивных воздействий на нее. Приведены результаты апробации на примере опорной цифровой автоматической телефонной станции.

*Ключевые слова:* сложная нелинейная динамическая система, системный анализ и синтез, теоретико-множественная модель, электромагнитная совместимость, цифровая автоматическая телефонная станция.

## 1. Введение

Широкое распространение цифровых устройств в современном телекоммуникационном оборудовании, применение компьютерных сетей при значительных информационных потоках приводит к возрастанию вероятности отказов в телекоммуникационных системах при воздействии электромагнитного импульса и электромагнитных факторов природного и техногенного происхождения (разрядов молнии, разрядов статического электричества, высоковольтных линий электропередачи, электромагнитных полей радиопередающих и радиоприемных станций). Поэтому в этих условиях становятся актуальными проблемы защиты и обеспечения функциональной безопасности информационных и телекоммуникационных систем.

Последствиями в случае отказа технических средств из-за воздействия электромагнитных помех могут быть как существенные материальные потери, так и угроза безопасности и жизни пользователя. Исследование вопросов устойчивости телекоммуникационного оборудования к электромагнитным помехам является необходимым и актуальным аспектом развития современной техники. В условиях нарастающего потребления электроэнергии требования к качеству электроэнергии как к фактору, во многом определяющему безотказное функционирование телекоммуникационного оборудования, должны соответствовать ГОСТ Р 54149-2010 и ряду других стандартов. И хотя в последние годы улучшилась ситуация по исследованию сетевых помех, задачи устойчивости телекоммуникационного оборудования к их воздействию не могут иметь оптимального решения, основываясь только на существовании нормативных требований. Необходимо проведение исследований опасных видов помех и предотвращение нежелательных от них последствий. В частном случае это защита телекоммуникационного оборудования от высоковольтных импульсных помех, представляющих собой один из наиболее опасных видов сетевых помех.

Проблемам оценки уровней кондуктивных помех и защиты телекоммуникационного оборудования от них посвящено значительное количество монографий и публикаций как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Так, М. А. Горловым, А. С. Кривовым, В. Ю. Кириловым, Л. Н. Кичиевым, В. Ю. Рогинским, М. В. Марченко, А. С. Строгоновым и другими авторами были рассмотрены физические основы возникновения импульсных и динамических

помех, механизмы их воздействия на электронную аппаратуру, методы и средства ее защиты на стадиях схмотехнического и конструктивного проектирования.

В современные телекоммуникационные системы внедрены информационно-вычислительные комплексы повышенного быстродействия, локальные и глобальные вычислительные сети. Построение систем телекоммуникаций на основе компьютерных сетей позволяет расширить ряд услуг, внедрить новые идентификационные документы в системы МВД, миграционной службы и т.п. При решении данной проблемы приходится сталкиваться с рядом трудностей, которые определяются несовершенством инфраструктуры зданий и помещений, предназначенных для размещения аппаратуры нового поколения, отсутствием ряда стандартов и методик проектирования. В первую очередь это относится к задачам информационной безопасности и электромагнитной совместимости (ЭМС), так как устаревшее оборудование было в меньшей степени восприимчиво ко многим типам разного вида помех. Если решать проблему ЭМС на этапе отладки установленных телекоммуникационных систем, это приведет к значительным затратам и с высокой долей вероятности потребует реконструкции помещений и переналадки оборудования. Поэтому очевидным является решение задачи ЭМС телекоммуникационного оборудования на более ранних этапах их внедрения, которые включают в себя строительство зданий, отделку помещения, размещение оборудования, прокладку кабельных систем, силовых цепей, выполнение заземления и т.п.

Многообразие архитектур телекоммуникационного оборудования с источниками вторичного электропитания, схмотехнических решений преобразователей, входящих в их состав, осложнили проблему ЭМС и одновариантности для достижения оптимального построения телекоммуникационной системы. При современном уровне развития цифрового оборудования связи стоит задача проверки функционирования телекоммуникационных систем при деструктивных воздействиях для удовлетворения требований по надежности системы и ЭМС. Многообразие компонентов сложной системы, существующие нелинейные взаимосвязи и большая вариативность являются препятствием к поиску простого решения данной задачи. В этом случае находит место применение методов системного анализа, который позволяет устанавливать и структурировать связи между элементами сложных нелинейных систем.

## 2. Постановка задачи

Современное телекоммуникационное оборудование и системы управления обладают большим количеством элементов, множеством связей и взаимосвязей, а также значительным объемом обрабатываемой информации. Для таких систем, включающих в себя большое число взаимосвязанных подсистем, более эффективным является для начала наметить основные подсистемы и определить главные связи между ними, после чего переходить к более детальному моделированию каждой из подсистем. На начальном этапе проектирования характерна ограниченность информации о свойствах будущей системы, поэтому сначала требуется обратиться к структуре системы и к информации, которую она содержит. Изучение особенностей этой информации относится к морфологическому анализу системы.

Морфологическое описание нужно для представления строения системы. Уровень детализации и глубина описания определяют, какие компоненты системы будут рассмотрены в качестве элементов. Морфологическое описание строится по иерархичному принципу. Уровень конфигурации морфологии определяется таким образом, чтобы создать представление об основных свойствах системы [1, 2].

Фундаментальный вклад в решение задач анализа и синтеза сложных динамических систем внесли российские и зарубежные ученые: С. В. Акимов, Д. А. Аветисян, В. Н. Волкова, А. А. Денисов, Д. Н. Колесников, Н. Н. Моисеев, В. М. Одрин, Ф. Цвикки и др. В работах ученых используется морфологический подход к решению задач системного анализа и синтеза, который был изложен Ф. Цвикки в 30-е годы и в дальнейшем получил развитие

С. В. Акимовым и В. М. Одриним. Метод позволяет сформировать упорядоченное морфологическое множество на уровне идентификации и представить сложную систему в виде морфологического дерева или морфологической таблицы [3, 4]. Результаты этих исследований сыграли огромную роль в формировании основных представлений о динамических свойствах сложных систем. Вместе с тем решения задач анализа и синтеза сложных систем носили разрозненный характер, не имели объединяющей концепции для интеграции методик исследований [5, 6]. Успехи, достигнутые в применении вычислительных методов, затенили теоретические основополагающие аспекты проблемы.

Задача системного анализа и синтеза сложных нелинейных систем с многовариантностью их построения является достаточно сложной и мало разработанной. Для нахождения оптимального решения существует ряд препятствий: неоднородность данных описания объекта, большая размерность обрабатываемой информации, усложняющая переработку данных, а также большое количество воздействующих факторов. Применение теоретико-множественных представлений позволит отобразить сложную многоуровневую систему и протекающие в ней процессы формальным языком при помощи совокупности множеств. Использование метода морфологического анализа и синтеза позволит определить классы объектов исследуемой области, выделить их классификационные признаки для формирования множеств из однородных элементов. Интеграция теоретико-множественных представлений, структурного и параметрического методов синтеза на базе морфологического множества иерархической структуры сложной нелинейной системы позволит разработать критерии и модели для синтеза оптимальной структуры с высокой надежностью функционирования.

Данная задача рассмотрена на примере цифровой автоматической телефонной станции с источником вторичного электропитания и соединительными линиями. Поставлены задачи по повышению эффективности принятия решений в сложной динамической структуре: выбор классификационных признаков, математическое описание объекта, создание имитационных моделей, разработка методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза. Для оценки функционирования сложной нелинейной системы с замкнутой обратной связью как в статических, так и в динамических режимах работы при большом многообразии внешних деструктивных воздействиях и смене состояний разработаны математические модели с использованием теоретико-множественного языка описания.

### 3. Теоретико-множественная модель

Представим сложную нелинейную систему совокупностью множеств, отображающих описание системы и протекающие в ней процессы (рис. 1):

- множество параметров системы задают начальные условия, требуемые для построения сложной системы  $P = \{p_h, h \in G\}, G = \{1, \dots, g\}$ ;
- множество требований сложной системы  $TR = \{tr_r, r \in U\}, U = \{1, \dots, r\}$  задают требования к системе и участвуют в формировании множества структур нелинейной системы  $S = \{s_c, c \in MC\}, MC = \{1, \dots, mc\}$ ;
- множество элементов системы  $L = \{l_e, e \in ME\}, ME = \{1, \dots, me\}$  описывают компоненты, входящие в состав системы, которые отбираются в зависимости от структуры системы;
- множество алгоритмов расчета статистических режимов работы формируются множеством  $A = \{a_{al}, al \in AL\}, AL = \{1, \dots, al\}$ ;
- множество деструктивных воздействий  $D_i(t_i) = \{d_i, i \in N\}, N = \{1, \dots, n\}$  описывает различные виды внешних деструктивных воздействий и является исходными данными для расчета моделей в динамических режимах работы;

- множество выходных сигналов  $K_j(t_j) = \{k_j, j \in P\}$ ,  $P = \{1, \dots, p\}$  используется для анализа множества входных  $IM = \{IM_1, IM_2, \dots, IM_{N_{IM}}\}$  и синтеза множества выходных  $OM = \{OM_1, OM_2, \dots, OM_{N_{OM}}\}$  модальностей.

Множество моделей в динамических режимах работы (МД) обеспечивают проверку системы на устойчивость к внешним деструктивным воздействиям  $D$ , где сложная система представляется в виде схемы с сосредоточенными параметрами и включает пассивные элементы и ключи для перехода из одного состояния в другое. Воздействие описывается функцией  $D_n(t_n)$  и поступает на вход  $k$ -го блока, действие которого описывается функцией  $R$  (рис. 2).

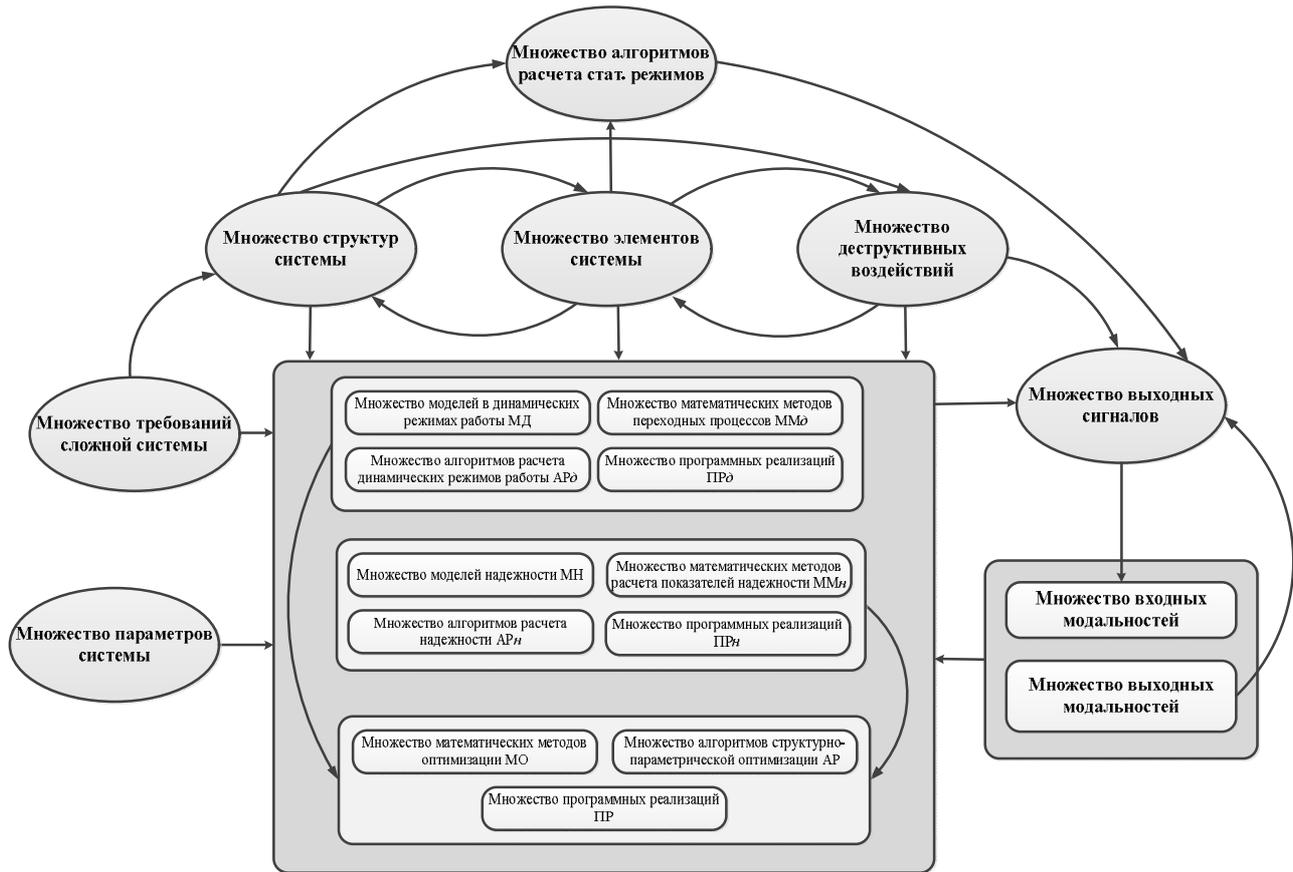


Рис. 1. Теоретико-множественная модель сложной нелинейной системы



Рис. 2. Обобщенная модель деструктивных воздействий на сложную нелинейную систему

Для установления и структурирования связей между множествами системы вводится множество  $V = \{V_k\}$ , состоящее из множества  $k$  связей между элементами различных уровней, представленных в виде морфологической таблицы (табл. 1) и сформированных на ее основе возможных путей (1).

Таблица 1. Морфологическая таблица множества связей между элементами различных уровней

Основное множество	Подмножества	Элементы		
A <sub>1</sub> Множество структур	A <sub>11</sub> Топологий соединения элементов	A <sub>111</sub> Радиальная	A <sub>112</sub> Магистральная	A <sub>113</sub> Смешанная
	A <sub>12</sub> Источников бесперебойного электропитания	A <sub>121</sub> Буферная	A <sub>122</sub> Буферная с конвертором	A <sub>123</sub> Буферная с отделенной от нагрузки аккумуляторной батареей
	A <sub>13</sub> Телекоммуникационного оборудования	A <sub>131</sub> С расширением	A <sub>132</sub> Без расширения	
A <sub>2</sub> Множество элементов	A <sub>21</sub> Преобразователи энергии	A <sub>211</sub> Выпрямительные устройства	A <sub>212</sub> Конверторы	
	A <sub>22</sub> Источники энергии	A <sub>221</sub> Аккумуляторные батареи	A <sub>222</sub> Собственная электростанция	
	A <sub>23</sub> Коммутация	A <sub>231</sub> Автоматический ввод резерва	A <sub>232</sub> Шкаф вводно-распределительный	A <sub>233</sub> Рядовое распределительное устройство
	A <sub>24</sub> Соединительные элементы	A <sub>241</sub> Кабели	A <sub>242</sub> Шины	
A <sub>3</sub> Геометрическая топология пространства	A <sub>31</sub> Габаритных размеров	A <sub>311</sub> Компоненты	A <sub>312</sub> Пространство	
	A <sub>32</sub> Нормативных допусков			
A <sub>4</sub> Защита	A <sub>41</sub> Заземление			
	A <sub>42</sub> Молниезащита			
	A <sub>43</sub> Рядовая защита			

$$A_{11} \rightarrow A_{21} \rightarrow \dots \rightarrow A_{n2} \cup A_{11} \rightarrow A_{21} \rightarrow \dots \rightarrow A_{nk} \cup A_{11} \rightarrow A_{22} \rightarrow \dots \rightarrow A_{n1} \cup \cup A_{12} \rightarrow A_{22} \dots \rightarrow A_{n1} \cup A_{12} \rightarrow A_{2j} \rightarrow \dots \rightarrow A_{n2} \cup A_{1h} \rightarrow A_{22} \rightarrow A_{\dots} \rightarrow A_{n1} \quad (1)$$

Для анализа функционирования системы при деструктивных воздействиях разработана обобщенная модель сложной нелинейной системы (рис. 3), позволяющая учесть уровни перенапряжений при различных деструктивных воздействиях с учетом разных вариантов соединения функциональных блоков (которые задаются сменой положений ключей S). Все состояния ключей описываются таблицей, пример которой представлен табл. 2 при деструктивном воздействии по входу.

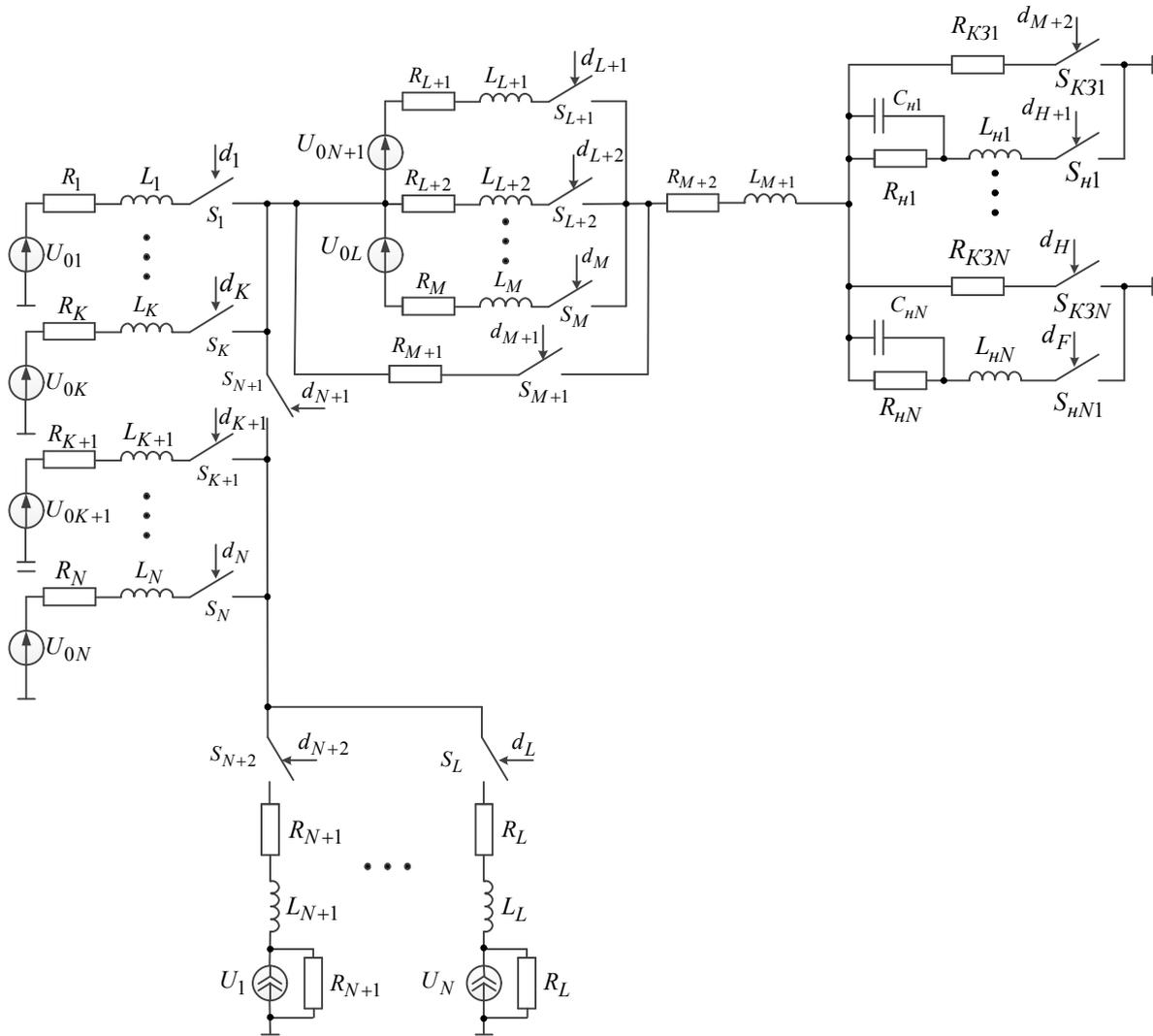


Рис. 3. Обобщенная модель для анализа деструктивных воздействий на сложную нелинейную систему

Таблица 2. Положения ключей при деструктивном воздействии по входу

Воздействие \ Режим	$d_1 \dots d_K$	$d_{K+1} \dots d_N$	$d_{N+1}$	$d_{N+2} \dots d_L$	$d_{L+1} \dots d_M$	$d_{M+1}$	$d_{M+2} \dots d_H$	$d_{H+1} \dots d_F$
	Состояния ключей							
Режим 1	0	0	1	$1 \rightarrow 0$	1	0	0	1
Режим 2	0	1	0	$0 \leftarrow 1$	1	0	0	1
Режим 3	0	0	1	1	1	0	0	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...
Режим N	0	1	1	1	0	1	1	0

Результаты моделирования совокупности подмножеств моделей в динамических режимах работы (МД), математических методов при расчете динамического режима работы (ММ<sub>д</sub>), алгоритмов расчета переходных процессов при деструктивных воздействиях  $D_n(t_n)$  (AP<sub>д</sub>) и программных реализаций при динамическом режиме работы (ПП<sub>д</sub>) сводятся к множеству допустимых системотехнических решений  $\Delta_\alpha$  :

$$\Delta_\alpha = \{ \alpha = \langle m_d, ap_d, np_d, mm_d \rangle \mid m_d \in MD, mm_d \in MM_d, ap_d \in AP_d, np_d \in PP_d \}. \quad (2)$$

Для анализа надежности функционирования сложной нелинейной системы в аварийном и нормальном режимах работы приведена обобщенная схема (рис. 3), на основе различных конфигураций которой составляет оптимальная схема расчета надежности системы. Показатель  $\lambda_{эл}$  является интенсивностью отказов элементов системы, а  $\lambda_{сл}$  – интенсивность отказов соединительных линий системы. Общую схему надежности системы (рис. 3а) также можно представить в виде блока надежности, который, в свою очередь, можно соединять параллельным или последовательным способом (рис. 3б), укрупняя конечную схему.

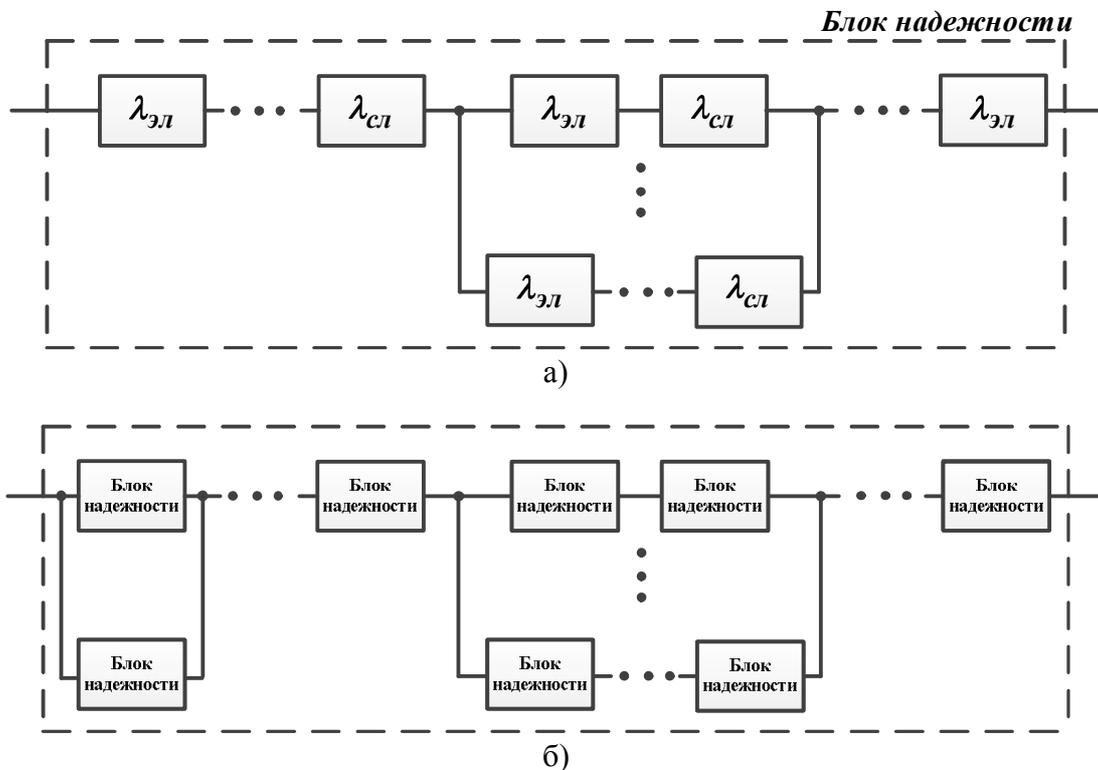


Рис. 3. Надежность системы

Результаты моделирования совокупности подмножеств моделей надежности (МН), математических методов расчета надежности (ММ<sub>н</sub>), алгоритмов расчета параметров надежности (AP<sub>н</sub>) и программных реализаций (ПП<sub>н</sub>) сводятся к множеству допустимых системотехнических решений  $\Delta_\beta$  :

$$\Delta_\beta = \{ \beta = \langle mn, ap_n, np_n, mm_n \rangle \mid mn \in MN, mm \in MM_n, ap \in AP_n, np \in PP_n \}. \quad (3)$$

Множество  $\Delta_\gamma$  является множеством допустимых системотехнических решений, включающее подмножества математических методов оптимизации (МО), алгоритмов структурно-параметрической оптимизации (AP), программных реализаций (ПП):

$$\Delta_\gamma = \{ \gamma = \langle mo, np, ap \rangle \mid mo \in MO, ap \in AP, np \in PP \}. \quad (4)$$

### 3. Апробация

Предложенная теоретико-множественная модель была применена для сложной нелинейной системы, которой является опорная цифровая автоматическая телефонная станция (ЦАТС) МС240С с источником вторичного электропитания УЭП2-3. ЦАТС МС240С включает в себя 24 абонентских комплекта, центральный процессор, VoIP-шлюз, модуль ТМ.ІР, предназначенный для передачи голосовой и факсимильной информации. Потребляемая мощность центрального процессора составляет 15 Вт, VoIP-шлюза и модуля ТМ.ІР – 6 Вт и 6 Вт соответственно. УЭП2-3 питается от сети переменного тока 220 В и обеспечивает питание постоянным током ЦАТС до 48 А с выходным напряжением 43...57 В или 53...–69 В. К опорной ЦАТС МС240С подключаются блоки расширения (рис. 4), которые выполнены в виде каркаса станции МС240С с установленными модулями абонентских комплектов и модулем контроллера сопряжения. Коммутация соединений осуществляется ЦП.Е, установленным в управляющем каркасе.

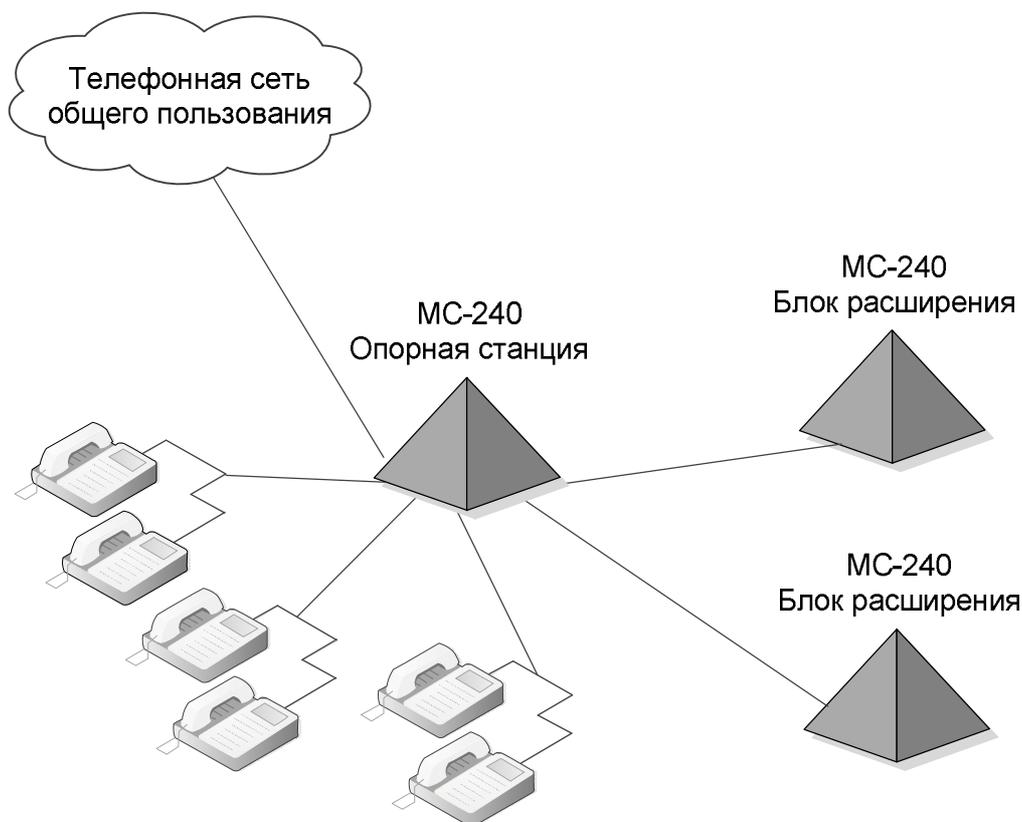


Рис. 4. Схема связи с расширением

Одним из основных методов оптимизации (МО на рис. 1) является структурно-параметрическая оптимизация, проводимая для отобранного оборудования по трем критериям: 1) техническим характеристикам; 2) условиям габаритных размеров; 3) показателям надежности и экономичности:

$$F_s = \min \left[ \left( \min \sum_{k=1}^N F_{ОБ}^k \right) + \sum_{i=1}^M F_{ПР}^i \right]. \quad (5)$$

В результате проведения оптимизации были получены альтернативные решения выбора компонент системы и их размещения в пространстве, соответствующие выбранным критериям оптимизации с учетом нормативных требований к телекоммуникационной системе. Результаты лучших вариантов согласно трем этапам минимизации отображены на гистограммах

(рис. 5). В табл. 3 отображены некоторые численные характеристики лучших вариантов, где  $\lambda$  – показатель надежности,  $\eta$  – коэффициент полезного действия,  $C$  – суммарная стоимость оборудования,  $G$  – суммарный вес оборудования.

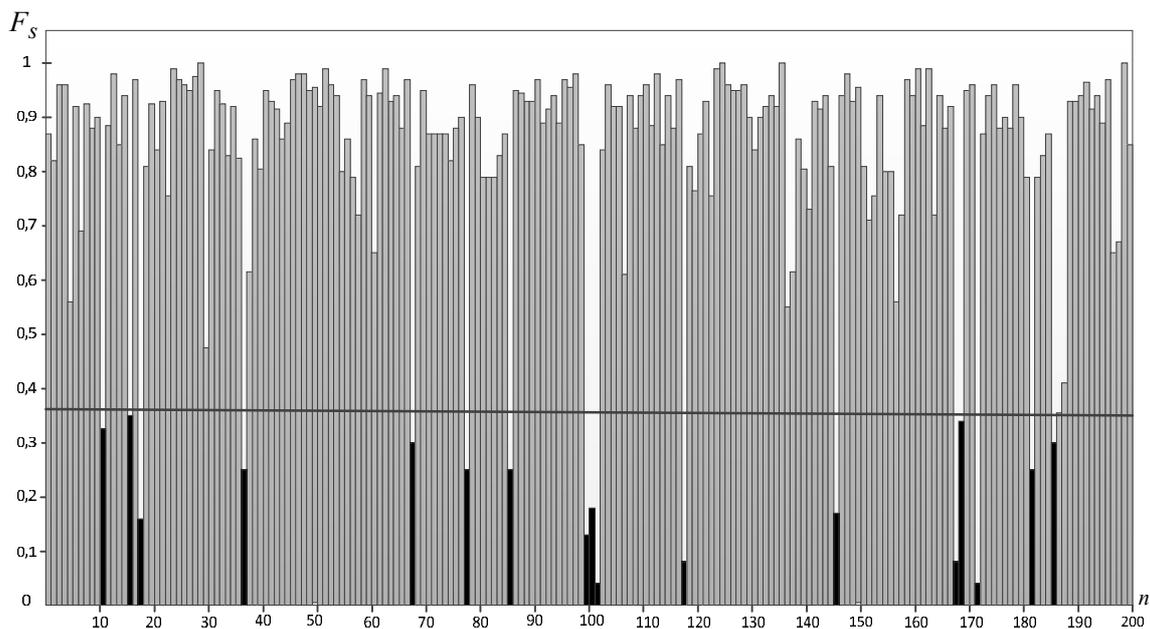


Рис. 5. Гистограммы минимизации оборудования

Таблица 3. Результаты лучших вариантов

№ варианта	11	15	17	36	68	78	99	100
$\lambda$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$8,02 \cdot 10^{-7}$	$8,10 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$
$\eta$	0,84	0,84	0,86	0,83	0,85	0,84	0,8	0,86
$C$	$1,880 \cdot 10^3$	$1,840 \cdot 10^3$	$1,11 \cdot 10^3$	$1,75 \cdot 10^3$	$1,811 \cdot 10^3$	$1,851 \cdot 10^3$	$1,74 \cdot 10^3$	$1,653 \cdot 10^3$
$G$	802	799	703	760	860	878	822	627
№ варианта	101	118	146	167	168	172	182	186
$\lambda$	$7,89 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-7}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-7}$	$8,89 \cdot 10^{-7}$	$7,73 \cdot 10^{-7}$	$8,21 \cdot 10^{-7}$	$8,11 \cdot 10^{-7}$
$\eta$	0,84	0,85	0,84	0,83	0,85	0,87	0,84	0,82
$C$	$1,657 \cdot 10^3$	$1,855 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$1,940 \cdot 10^3$	$1,900 \cdot 10^3$	$1,572 \cdot 10^3$	$1,72 \cdot 10^3$	$1,763 \cdot 10^3$
$G$	758	850	832	826	760,4	658,6	880	780

При поиске глобального экстремума получена оптимальная структура ЦАТС (рис. 6).

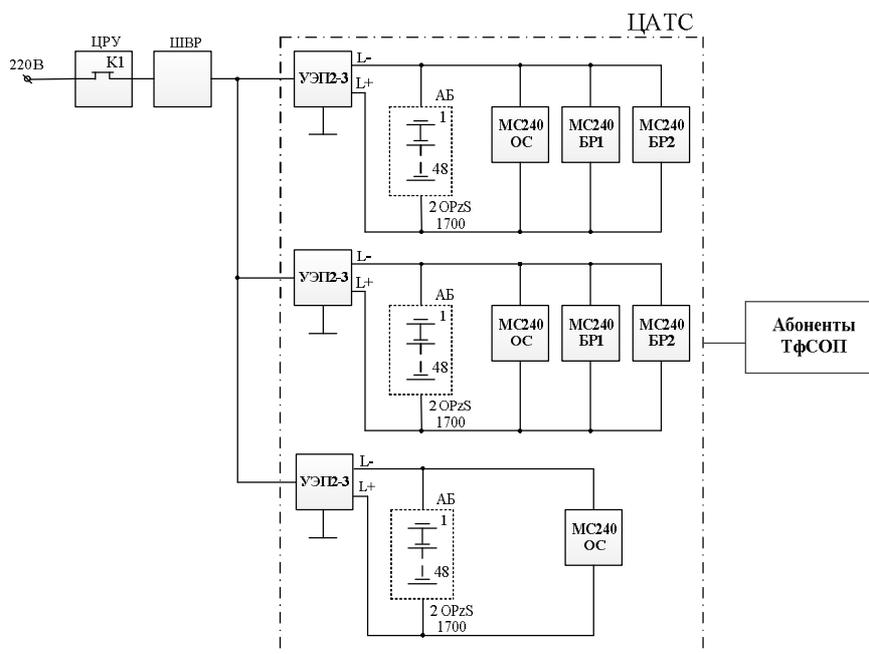


Рис. 6. Схема цифровой автоматической телефонной станции с блоками расширения

#### 4. Выводы

Оптимальная структура цифровой автоматической телефонной станции включает в себя: аккумуляторные батареи 20PzS емкостью 1700А·ч в количестве 48 штук, выпрямительные устройства Eltek 3 стойки по 14 модулей, конвертор Eltek Microrack DC/DC 120. Суммарная надежность выбранного оборудования составляет  $\lambda_{\text{сумм}} = 6.486 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$ , коэффициент полезного действия  $\eta = 0,85$ , стоимость единицы массы оборудования  $C = 1.855 \cdot 10^3$  условных единиц, суммарный вес оборудования  $G = 850$  кг. По результатам проведенных расчетов цифровая автоматическая телефонная станция потребляет мощность 79.4419 кВА. Топология соединения элементов построена по радиально-магистральной схеме с выбором автоматов защиты DPX-630, DPX-250 и DPX-160, время срабатывания которых не превышает 0.9 с. Конфигураций сети – буферная система электропитания с конвертором.

#### Литература

1. Акимов С. В. Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://structuralist.narod.ru/dictionary/morphbox.htm>.
2. Акимов С. В. Structuralist – язык моделирования морфологического множества // 56-я НТК СПбГУТ. СПб.: СПбГУТ, 2004. С. 75.
3. Волкова В. Н. Денисов А. А. Теория систем и системный анализ, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2015. 616 с.
4. Одрин В. М., Картавов С. С. Морфологический анализ систем. Построение морфологических таблиц. К.: Наукова думка, 1977. 148 с.
5. Антонов А. В. Системный анализ. М.: Высшая школа, 2004. 454 с.
6. Губанов В. А., Захаров В. В., Коваленко А. Н. Введение в системный анализ. Л.: ЛГУ, 1988. 228 с.

Статья поступила в редакцию 12.04.2019.

**Губкина Валерия Руслановна**

старший преподаватель кафедры САПР СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86),  
тел. (383) 269-82-59, e-mail: vg@sibsutis.ru.

**Set-theoretic model for solving the problem of system analysis and synthesis  
in telecommunications**

**V. Gubkina**

A set-theoretic model for solving the problem of system analysis and synthesis in a complex nonlinear system, taking into account the input parameters, the requirements for the output characteristics, the variability of the architecture of the system, external destructive effects on it is considered. The results of testing approved on digital automatic telephone exchange are presented.

*Keywords:* complex nonlinear dynamic system, system analysis and synthesis, set-theoretic model, electromagnetic compatibility, digital automatic telephone exchange.