# Формализация процедур прогнозирования при организации управления мультисервисными сетями связи

# Formalisation of forecasting procedures in the organization of the management of multi-service communication networks

**Аванесов / Avanesov M.**
Михаил Юрьевич
(avanesov@itain.ru)
кандидат технических наук.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
научный секретарь.
г. Санкт-Петербург

**Буренин / Burenin A.**
Андрей Николаевич
(direct-2011@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
АО «Научно-исследовательский институт «Рубин»,
ведущий научный сотрудник.
г. Санкт-Петербург

**Чуйков / Chujkov V.**
Владимир Борисович
(v.b.chujkov@rubin-spb.ru)
кандидат технических наук, доцент
АО «НИИ «Рубин»,
заместитель генерального директора.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: система – system; мультисервисная сеть связи – multiservice networks.; управление – management; случайный процесс – casual process; оптимизация – optimization.

Рассматриваются основные проблемы, возникающие в процессе прогнозирования параметров мультисервисных сетей связи, используемых при организации управления ими. Выработка управляющих воздействий осуществляется при этом для прогнозируемых значений состояния сети. Предлагается решение задач прогноза параметров осуществлять процедурами, полученными на основе анализа и обоснованного выбора комплекса известных методов прогнозирования величин и процессов.

The main problems that arise in the process of forecasting the parameters of multiservice communication networks used in the organization of their management are considered. The development of control actions is carried out for the predicted values of the network state. It is proposed to solve the problems of predicting parameters with procedures obtained on the basis of analysis and reasonable choice of a set of known methods for predicting quantities and processes.

## Введение

Создаваемые в настоящее время в различных ведомствах и крупных корпорациях (например, госкорпорациях) РФ перспективные мультисервисные сети связи (МСС) основаны на концепции сетей следующего поколения (NGN-сетей) [1].

Основой архитектурного построения любой МСС является транспортная сеть (как правило, двухуровневая), сети доступа, узлы телекоммуникационных служб и узлы управления услугами (рис. 1).

Как правило, в рамках МСС все предоставляемые телекоммуникационные услуги характеризуются транзакциями, которые осуществляет пользователь (потребитель услуги) при запросе/активизации требуемой услуги. При этом важно, что каждому легитимному пользователю позволено получить полные права по санкционированному использованию определенной услуги, при условии выполнения всех условий санкционированности доступа к ней.

Пользователи могут воспользоваться услугами напрямую или с помощью пользовательских приложений. При этом все компоненты пользовательских приложений должны полностью поддерживаться в МСС, а сами компоненты, как и услуги, обычно объединяются в пакеты, чтобы создать для конкретного пользователя ведомства (корпорации) требуемую сложную услугу или предоставить доступ к необходимым приложениям.

Обеспечить требуемое качество функционирования МСС в условиях естественных и искусственных помех, информационных и других воздействий нарушителей, (векторы $\mathbf{\Pi}(t), \mathbf{R}(t), \mathbf{S}(t)$) возможно только при организации непрерывного эффективного управления ею [1], что определяет необходимость включения в состав МСС, еще и автоматизированной системы управления (АСУ).

При формировании управляющих процессов (рис. 2) АСУ МСС вырабатывает многомерный вектор управ-



2 2021.indd 58 06.07.2021 20:23:41

ления, представляющий собой композицию векторов управления прикладным, промежуточным и базовым уровнями МСС:

$$\mathbf{U}_{MNS}(t_{\text{Н}}) = [\mathbf{u}_{IL}(t_{\text{Н}}), \mathbf{u}_{MWL}(t_{\text{Н}}), \mathbf{u}_{BL}(t_{\text{Н}})], \quad (1)$$

где $\mathbf{u}_{IL}(t_{\text{Н}}), \mathbf{u}_{MWL}(t_{\text{Н}}), \mathbf{u}_{BL}(t_{\text{Н}})$ – векторы управления соответственно прикладным, промежуточным и базовым уровнями МСС, выработанные на момент времени начала каждого цикла управления сетью, т. е. $t = t_{\text{Н}}$.

Однако в силу инерционности процедур управления (задержка в принятии решений, задержка в передаче служебной информации и пр.) выработанные векторы управления $\mathbf{u}_{IL}(t_{\text{Н}}), \mathbf{u}_{MWL}(t_{\text{Н}}), \mathbf{u}_{BL}(t_{\text{Н}})$ не будут адекватны состоянию МСС, сложившемуся в сети в момент $t = t_{\text{Н}}$. Очевидно необходимо выработать векторы управления, актуальные для момента времени $t = t_{\text{Н}} + \Delta t_{pr}$, в котором составляющая $\Delta t_{pr}$ определяет указанные задержки:

$$\mathbf{U}_{MNS}(t_{\text{Н}} + \Delta t) = [\mathbf{u}_{IL}(tt_{\text{Н}} + \Delta t_{pr}), \mathbf{u}_{MWL}(t_{\text{Н}} + \Delta t_{pr}), \mathbf{u}_{BL}(t_{\text{Н}} + \Delta t_{pr})], \quad (2)$$

где $\mathbf{u}_{IL}(t_{\text{Н}} + \Delta t_{pr}), \mathbf{u}_{MWL}(t_{\text{Н}} + \Delta t_{pr}), \mathbf{u}_{BL}(t_{\text{Н}} + \Delta t_{pr})$ – векторы управления соответственно прикладным, промежуточным и базовым уровнями МСС на прогнозируемый период (т. е. на момент $t = t_{\text{Н}} + \Delta t_{pr}$), рис. 3.

Для получения прогнозных значений параметров, в совокупности определяющих состояние МСС, и являющихся, в конечной мере, параметрами управления: векторы поступающей нагрузки $\mathbf{\Lambda}_{IL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{\Lambda}_{MWL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{\Lambda}_{BL}(t + \Delta t_{pr})$, векторы параметров обслуживания $\mathbf{M}_{IL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{M}_{MWL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{M}_{BL}(t + \Delta t_{pr})$, а также векторы $\mathbf{\Pi}_{IL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{S}_{IL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{R}_{IL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{\Pi}_{MWL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{S}_{MWL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{R}_{MWL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{\Pi}_{BL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{S}_{BL}(t + \Delta t_{pr})$, $\mathbf{R}_{BL}(t + \Delta t_{pr})$, требуется оперативно получать значения их оценок, т. е. оценок соответственно параметров нагрузки, обслуживания, структур, помех и кибератак для всего интервала прогноза:

$$\mathbf{\Lambda}^*_{IL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{\Lambda}^*_{MWL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{\Lambda}^*_{BL}(t + \Delta t_{pr}),$$
$$\mathbf{M}^*_{IL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{M}^*_{MWL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{M}^*_{BL}(t + \Delta t_{pr}),$$
$$\mathbf{\Pi}^*_{IL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{S}^*_{IL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{R}^*_{IL}(t + \Delta t_{pr}),$$
$$\mathbf{\Pi}^*_{MWL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{S}^*_{MWL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{R}^*_{MWL}(t + \Delta t_{pr}),$$
$$\mathbf{\Pi}^*_{BL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{S}^*_{BL}(t + \Delta t_{pr}),\ \mathbf{R}^*_{BL}(t + \Delta t_{pr}).$$

При решении задач прогнозирования состояния МСС требуется проанализировать проблему прогнозирования параметров как таковую и выбрать соответствующие способы прогноза.

Прогнозирование будущего состояния МСС основывается на изучении тенденций, наблюдающихся в

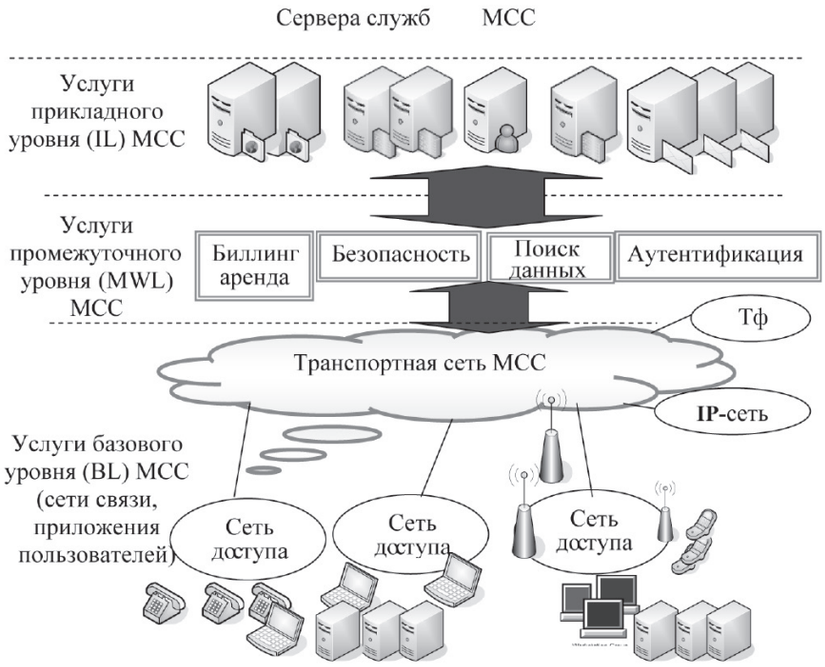


*Рис. 1. Многоуровневая функциональная архитектура МСС*



2 2021.indd 59 06.07.2021 20:23:43

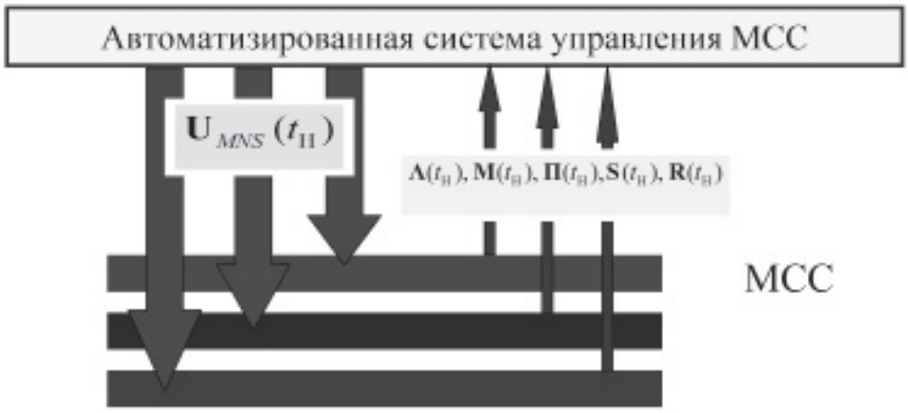


*Рис. 2. Формализованная схема управления МСС*

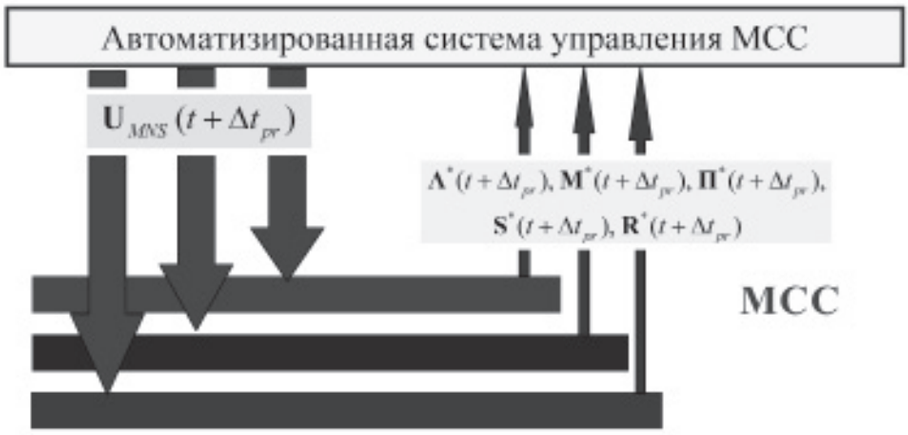


*Рис. 3. Формализованная схема прогнозного управления МСС*

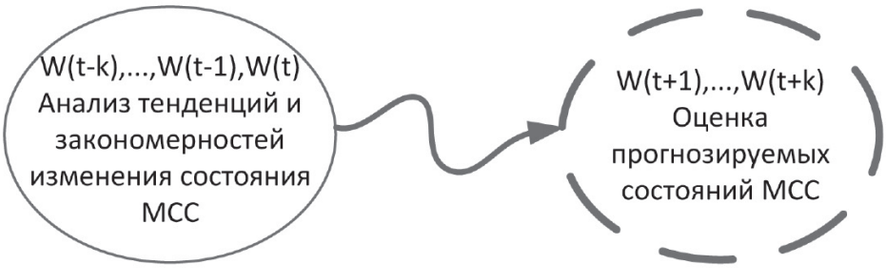


*Рис. 4. Оценка прогнозируемых состояний МСС на основе изучения тенденций и закономерностей изменения предыстории*



2 2021.indd 60 06.07.2021 20:23:43

изменениях ее текущего состояния, которое может быть представлено совокупностью значений контрольных параметров, рис. 4.

Очевидно, что причиной, вызывающей изменения состояния МСС, должны являться изменения значений именно этих параметров. Поэтому прогнозирование состояния сети должно основываться на прогнозировании значений соответствующих контрольных параметров, что может осуществляться на базе некоторого математического аппарата выявления процессов, описывающих закономерности их изменений.

В свою очередь, использование математического аппарата потребует формализации процессов изменения контрольных параметров, т. е. потребует создания некоторой системы математических моделей их изменения. При этом конечной целью является разработка способов и алгоритмов прогноза, достаточно просто реализуемых в системе управления.

В общем, выполнение любой формы контроля МСС основывается на использовании общей модели сети, которая должна позволять выделять достаточную совокупность контролируемых параметров для получения соответствующего решения на заданном уровне достоверности, как для контроля функционирования, так и для допускового контроля, контроля качества, диагностического контроля, прогнозирующего контроля и т. д.

Естественно, что выделение совокупностей контрольных параметров для каждого вида контроля обладает своей спецификой, зависящей, в том числе, от конкретного способа и алгоритма.

Для контроля функционирования МСС в качестве контролируемых параметров используют входные и выходные параметры основных ее подсистем и комплексов. Для контроля качества контролируемыми параметрами будут являться параметры качества, как правило, представляющие собой некоторые внутренние параметры подсистем и комплексов. Для диагностического контроля используют вспомогательные параметры, а для прогнозирующего контроля выделяют специальные прогнозирующие параметры, которые, во-первых, должны с достаточной точностью представлять состояние МСС, во-вторых, должны отражать основные тенденции в изменениях свойств подсистем и комплексов сети, а в-третьих, должны допускать их измерение с необходимой точностью. Из проведенных выше положений следует, что круг даже самых основных вопросов, связанных с проблемой прогноза состояния МСС, достаточно широк. Отметим сразу, что исчерпывающее исследование всех этих вопросов вряд ли возможно осуществить в настоящее время.

## Методология прогнозирования

Прогнозирование состояния МСС, с целью использования для организации управления сетью, является одним из конкретных видов предсказания, который определяется специфической постановкой задачи и который должен основываться на математическом аппарате, отражающем существо проблем при проведении прогноза. Особенности, присущие прогнозированию состояния такой сложной системы, которой является МСС, отражены применением известных способов прогноза характеристик технических средств и комплексов, нашедших практическое применение: прогнозирование ряда эксплуатационных и надежностных характеристик технического оборудования. В основе математического аппарата такого прогноза лежат модели надежности и живучести, законы распределения интенсивности внезапных отказов (надежность и живучесть комплексов МСС) и закономерности, вызывающие постепенные и накапливающиеся отказы.

Как правило, достоверность получаемых оценок сравнительно невелика, что объясняется трудностью учета всех особенностей реальных объектов в МСС. Поэтому для таких сетей получил развитие способ прогнозирования характеристик технических объектов, основанный на использовании информации о ряде сетевых элементов или комплексов сети. Эта информация задается относительно конкретных экземпляров сетевых изделий (комплексов), и поэтому прогноз характеристик будет выполняться соответственно только для отдельных подсистем или комплексов МСС. Математический аппарат прогнозирования параметров таких комплексов может быть основан на методах теории распознавания образов.

Вместе с тем ни один из вариантов прогноза не учитывает, да и не может учитывать, всех действительных особенностей эксплуатации оборудования МСС в различных условиях, не может использовать данных по истории его функционирования.

Процедуры основываются на периодическом выполнении измерений совокупностей контрольных параметров объекта контроля в МСС. Измерение каждого $j$-го контрольного параметра дает некоторую его величину $y_i$, отнесенную к определенному моменту времени $t_i$, т. е. $y_j(t_i)$. От цикла к циклу контроля и управления МСС эти измеренные значения накапливаются в базе данных (БД) в виде множества $\{y_j(t_i)\}$, на основе элементов которого можно определить тенденции в изменениях соответствующих параметров МСС, что, в свою очередь, может явиться основой для оценки значений этих параметров в любой заданный будущий момент времени $t_v$. При этом должен существовать некоторый оператор $H$, связывающий между собой накопленную совокупность значений $\{y_j(t_i)\}$ и оценку будущего значения контрольного параметра:

$$y_j(t_v) = H\left(\{y_j(t_i)\}\right). \tag{3}$$

Форма оператора $H$, очевидно, зависит от целого ряда принятых допущений и ограничений, а также



2 2021.indd 61 06.07.2021 20:23:44

от объема и конкретного содержания любых дополнительных сведений, которые могут быть использованы при прогнозировании, а качество оператора $H$ – определяться критерием точности прогнозирования, который может быть задан как функция от погрешности прогнозирования, равной разности между действительным значением параметра в момент времени $t_v$ и его оценкой, полученной для этого же момента времени:

$$K_{kw} \le (\ge) f[\varepsilon_j(t_v)] = f[y_j(t_v) - y_j(t_v)] = f\left\{y_j(t_v) - H\left(\{y_j(t_i)\}\right)\right\}. \quad (4)$$

Выбор математического аппарата прогнозирования в значительной степени сводится к определению конкретной формы оператора $H$, представляющего собой оператор экстраполяции дискретной последовательности контрольных величин. Таким образом, задача выбора оператора прогнозирования значений параметров МСС по своему содержанию оказывается близкой к задаче синтеза предсказывающего фильтра в теории оптимальной фильтрации, которая содержит целый ряд детально разработанных способов, предназначенных для решения конкретных вариантов фильтрации. Каждый вариант задачи основывается на различных ограничениях, накладываемых на тип предсказателя, допущениях о характере параметра, объеме и виде исходной информации (уровне знания предыстории), критерии оптимальности. Анализ этих способов может быть непосредственно полезным при выборе и обосновании математического аппарата прогнозирования.

## Способы прогнозирования

В рассматриваемых задачах предсказания, математической моделью параметра может быть либо детерминированная функция времени, либо случайный процесс, как стационарный, так и нестационарный [2–7]. Если параметр МСС рассматривается как детерминированная функция времени, предсказание выполняется способом конечных разностей. Простейшая структура случайного параметра – стационарная случайная последовательность (принята Колмогоровым). Винер решил задачу предсказания для параметра, состоящего из двух стационарных составляющих: полезного параметра и шума. В работах Заде – Рагаззини, Блюма в качестве параметра рассматривается аддитивный нестационарный случайный процесс, содержащий полезный параметр и шумовой компонент.

Параметр может быть непрерывным, как это имеет место в задачах Винера, Заде – Рагаззини, или дискретным (задачи Колмогорова, Блюма).

В качестве критерия качества предсказания целесообразно взять минимум среднеквадратической ошибки прогноза. При этом основное внимание следует уделять большим отклонениям. Поскольку с математической точки зрения критерий минимума среднеквадратической ошибки является простейшим, то это объясняет широкое применение квадратичного приближения функций в практических вариантах управления, в т. ч. управления МСС.

Для многих параметров МСС, используемых при организации управления, можно пренебречь случайной составляющей, и в качестве математической модели основного процесса принять детерминированную функцию времени. Естественно, что при этом дисперсия случайной составляющей незначительна по сравнению с абсолютным значением детерминированной функции и для решения задачи прогнозирования (предсказания) используют аппарат экстраполяции.

На самом деле обычно дисперсия величины параметра МСС отлична от нуля, поэтому процедура экстраполяции приводит к появлению заметных погрешностей.

Решение задачи прогнозирования выполняется по следующей схеме: по известным значениям параметра $\{y_j(t_i)\}$ строится интерполяционная функция $\{y_j(t_i)\}$ которая в узлах интерполяции $\{t_j\}$ принимает те же значения, что и параметр, т. е. $F(t_j) = y(t_j)$.

Задача интерполяции при произвольной форме функции $F(t)$ имеет бесчисленное множество решений и для обеспечения однозначности решения выбирают определенную форму интерполяционной функции, например полином степени $n$, при этом считают, что характер изменения параметра достаточно хорошо представляется таким полиномом. Тогда если вместо функции $F(t)$ искать полином степени не выше $n$, удовлетворяющий условиям $F(t_j) = y(t_j)$, то решение становится однозначным. При этом следует иметь в виду, что ($l$+1)-я производная полинома степени $l$ равна нулю в любой момент времени, ($l$+1)-е разности обращаются в нуль, а $l$-е будут постоянными.

Для параметра, заданного ($n$+1)-м значением $\{y_j(t_i)\}$, оценивается значение параметра в упреждающий момент времени $t_n + \alpha$, где $\alpha = \Delta t_{изм} = t_j - t_{j-1}$.

Интерполяционным полиномом в этом случае будет полином $n$-й степени, у которого $n$-е разности постоянны, тогда $\Delta^n y(t_{n+1}) = \Delta^n y(t_n)$, а для предсказываемого значения параметра можно получить:

$$y(t_n + \alpha) = y(t_n) - ny(t_{n-1}) + \frac{n(n-1)}{2!} y(t_{n-2}) + \ldots + (-1)^n y(t_0) = \sum_j (-1)^j C_n^j y(t_j). \quad (5)$$

Выражение (5) может быть представлено в следующем виде:

$$y(t_n + \alpha) = \sum_j y(t_j) W(t_j), \quad (6)$$



2 2021.indd 62 06.07.2021 20:23:52

где

$$W(t_j) = (-1)^j C_n^j,\ 0 \le j \le n.$$

Дисперсия предсказываемого значения параметра МСС определяется выражением:

$$D = D_{G+N} \sum_j W^2(t_j) = D_{G+N}\xi. \tag{7}$$

Величина $\xi$ показывает, во сколько раз дисперсия случайного компонента предсказанного значения параметра больше дисперсии неучтенных случайных компонент этого же параметра $D_{G+N}$, которая зависит от числа наблюдений и степени интерполяционного полинома.

Уменьшить величину погрешности предсказания при увеличении числа наблюдений параметра позволяет применение способа наименьших квадратов. При этом параметром является детерминированная функция времени, значения которой в фиксированные моменты времени определены с некоторой погрешностью. Функцией, аппроксимирующей детерминированную составляющую параметра, принимается полином заданной степени.

По совокупности значений параметра отыскиваются коэффициенты $\vartheta_v$ полинома, которые минимизируют величину:

$$f = \sum_{j=1}^{n} [y(t_j) - \sum_{v=0}^{L} \vartheta_v t_j^v]^2. \tag{8}$$

В результате получается система $L$+1 нормальных уравнений:

$$\frac{\partial f}{\partial \vartheta_v} = 2\sum_{j=1}^{n} [y(t_j) - \sum_{v=0}^{L} \vartheta_v t_j^v] t_j^v = 0. \tag{9}$$

Решением системы (9) являются оценки следующего вида:

$$\vartheta_v = \frac{\sum_{j=1}^{n} y(t_j)\Delta_m(j)}{\Delta}, \tag{10}$$

где $\Delta$ – определитель системы (9); $\Delta_m(j)$ – определитель системы, в которой $n$-й столбец заменен столбцом свободных членов.

Тогда оценка детерминированной составляющей параметра МСС в упрежденный момент времени будет определяться выражением:

$$N_d(t_n + \alpha) = \sum_{v=0}^{L} \vartheta_v (t_n + \alpha)^v = \frac{\sum_{j=1}^{n} y(t_j)\Delta_m(j)}{\Delta} (t_n + \alpha)^v. \tag{11}$$

В другом случае задача заключается в нахождении таких значений коэффициентов $W(t_j)$, при которых линейная комбинация $y(t_n + \alpha) = \sum_{j=1}^{n} W(t_j) y(t_j)$ даст, возможно, большее приближение к величине $y(t_n + \alpha)$ с точки зрения критерия минимума квадратической погрешности.

Погрешность приближения оценивается величиной $\varepsilon(t_n + \alpha)$, которая определяется следующим выражением:

$$\varepsilon(t_n + \alpha) = y(t_n + \alpha) - \sum_{j=1}^{n} W(t_j) y(t_j). \tag{12}$$

Ее дисперсия определяется следующим образом:

$$\sigma^2(n,a) = M\Big[ y^2(t_n + \alpha) - 2\sum_{j=1}^{n} W(t_j) M[y(t_n + \alpha) y(t_j)] + \\ + \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} W(t_j) W(t_i) M[y(t_j) y(t_i)]\Big]. \tag{13}$$

Очевидно величина $\sigma^2(n,a)$ должна быть минимизирована. Ясно, что при увеличении числа наблюдений $n$, по которым производится предсказание параметра МСС, величина $\sigma^2(n,a)$ не может возрастать, поэтому можно утверждать, что существует предел

$$\lim_{n\to\infty} \sigma^2(n,a) = \sigma^2(a). \tag{14}$$

Если параметр МСС представляется суммой информационной основы $S_{\inf}(t)$ и шума (помехи) $S_{ш}(t)$, которые являются непрерывными некоррелированными между собой стационарными случайными процессами с различными статистическими свойствами, корреляционные функции которых заданы, то критерием качества целесообразно выбрать минимум среднеквадратической ошибки.

Пусть $y(t) = S_{\inf}(t) + S_{ш}(t)$ – значение параметра на входе прогнозирующего модуля АСУ МСС. Тогда прогнозируемое значение параметра составит:

$$S_{\inf}(t + \alpha) = \int_0^{\infty} [S_{\inf}(t - \tau) + S_{ш}(t - \tau)] W(\tau) d\tau. \tag{15}$$

Разность между действительным и предсказанным значениями параметра МСС (т. е. ошибку предсказания), а также ее дисперсию можно выразить соответственно в виде

$$\varepsilon(t + \alpha) = S_{\inf}(t - \tau) - \int_0^{\infty} [S_{\inf}(t - \tau) + S_{ш}(t - \tau)] W(\tau) d\tau; \tag{16}$$

$$M[\varepsilon^2(t + \alpha)] = \varphi_{SS}(0) - 2\int_0^{\infty} [\psi(\alpha + \tau) W(\tau) d\tau + \\ + \int_0^{\infty} W(\tau_1) d\tau_1 \int_0^{\infty} W(\tau_2) \varphi_{SS}(\tau_2 - \tau_1) d\tau_2,$$



2 2021.indd 63 06.07.2021 20:23:54

где

$$\varphi_{SS}(0) = M[S_{\inf}(t+\alpha)\, S_{\inf}(t+\alpha)];$$
$$\psi(\alpha+\tau) = \varphi_{SS}(\alpha+\tau) + \varphi_{SN}(\alpha+\tau);$$
$$\varphi_{SS}(\alpha+\tau) = M[S_{\inf}(t+\alpha)\, S_{\inf}(t-\tau)];$$
$$\varphi_{SN}(\alpha+\tau) = M[S_{\inf}(t+\alpha)\, S_{ш}(t-\tau)];$$
$$\varphi(\tau_2-\tau_1) = \varphi_{SS}(\tau_2-\tau_1) + \varphi_{SN}(\tau_2-\tau_1) + \\ + \varphi_{NS}(\tau_2-\tau_1) + \varphi_{NN}(\tau_2-\tau_1)$$

Необходимым и достаточным условиями, которым должна удовлетворять функция $W(\tau)$ с тем, чтобы обеспечить минимум (16), является:

$$\psi(t+\alpha) = \int_0^{\infty} W(\tau)\varphi(t-\tau)d\tau \quad \forall\, t \ge 0\,. \tag{17}$$

Таким образом, задача ставится следующим образом: по известным корреляционным функциям $\varphi(\tau)$ и $\psi(\tau)$ требуется найти функцию $W(\tau)$, обеспечивающую минимум среднего квадрата ошибки, т. е. $\min M[\varepsilon^2(t+\alpha)]$.

В результате задача нахождения функции $W(\tau)$, минимизирующей ошибку предсказания, сводится к решению уравнения (17), которое является интегральным уравнением Винера – Хопфа первого рода и аналитическое решение которого выполняется методами теории функций комплексного переменного.

Если параметр МСС рассматривается как аддитивная смесь трех компонентов: детерминированного (информационная основа) $S_{\inf}(t)$, случайного (вариации информационной основы) $S_{sl\inf}(t)$ и шума (помехи) $S_{ш}(t)$, а детерминированный компонент представляется полиномом заданной степени с коэффициентами, принимающими произвольные значения (полностью отсутствует априорная информация о коэффициентах полинома, аппроксимирующего детерминированную составляющую процесса), случайная и шумовая компоненты представляются стационарными случайными процессами с известными корреляционными функциями, случайные составляющие параметра сети некоррелированы, то для прогнозирования параметра применяют более сложные способы.

Предыстория параметра МСС конечна и равна времени наблюдения. Оператор предсказания реализуется функцией $W(t)$. Отыскивается непрерывный оператор, обеспечивающий условный минимум среднеквадратической ошибки предсказания, причем условность экстремума заключается в выполнении дополнительных требований, предъявляемых к оператору для обеспечения равенства нулю ошибки смещения детерминированной составляющей на выходе модуля прогнозирования для любого момента времени, принадлежащего интервалу упреждения.

$$S(t+\alpha) = \int_0^T y(t-\tau)W(\tau)d\tau;$$
$$\sigma_S^2 = M\left[S(t+\alpha) - \int_0^T y(t-\tau)W(\tau)d\tau\right]^2. \tag{18}$$

При этом дополнительное условие экстраполяции детерминированной составляющей параметра $S_{\inf}(t)$ и нулевой ошибки смещения приводят соответственно к необходимости выполнения условий:

$$M\left[S_{\inf}(t+\alpha) - S_{\inf}(t+\alpha)\right] = 0;\ \int_0^T \tau^2 W(\tau)d\tau = (-\alpha)^v$$
$$\forall\, v = 0,1,2,...,L\,. \tag{19}$$

Для минимизации второго выражения (18) можно применить методы вариационного исчисления при условии выполнения соотношений (19). Тогда искомая функция $W(\tau)$ должна удовлетворять интегральному уравнению:

$$\int_0^T K_{S_{st}S_{st}}(t_1-\tau)W(\tau)d\tau = K_{S_{sl\inf}S_{st}}(t_1+\alpha) + \sum_{v=0}^{L}\eta_v t_1^v, \quad 0 \le t_1 \le T\,. \tag{20}$$

где

$$S_{st} = S_{sl\inf}(t) + S_{ш}(t);$$

$$K_{S_{st}S_{st}}(t_1-\tau) = M\left[S_{st}(t_1-\tau)S_{st}(t-t_1)\right];$$
$$K_{S_{sl\inf}S_{st}}(t_1+\alpha) = M\left[S_{sl\inf}(t_1+\alpha)S_{st}(t-t_1)\right].$$

Учитывая некоррелированность компонентов $S_{sl\inf}(t)$ и $S_{ш}(t)$, имеем $K_{S_{sl\inf}S_{st}}(t_1+\alpha) = K_{S_{sl\inf}S_{sl\inf}}(t_1+\alpha)$, при этом неопределенные множители Лагранжа $\eta_0, \eta_1, ..., \eta_L$ выбираются так, чтобы выполнялись условия (19).

Таким образом, уравнение (20) является уравнением оптимального прогнозирующего комплекса АСУ МСС, обеспечивающего минимум среднеквадратической ошибки предсказания при условии сведения к нулю ошибки смещения.

Если параметр МСС представлен случайной последовательностью, то решение отыскивается в виде оператора, обеспечивающего минимум среднеквадратической ошибки при условии несмещенности детерминированной составляющей этого параметра. Требование несмещенности оценки приводит к наложению $L$+1 ограничений на функцию $W(t)$, которая для рассматриваемого случая также будет представлять собой последовательность. Ограничения имеют вид:

$$\aleph = \mathbf{SW}, \tag{21}$$

где $\aleph$ – матрица-столбец независимых ограничений, налагаемых на искомую функцию $\mathbf{W}$;



2 2021.indd 64 06.07.2021 20:24:02

$$\mathbf{W} = \begin{matrix} W(t_1) \\ \dots \\ W(t_n) \end{matrix};$$

$$\mathbf{S} = \begin{matrix} S_0(t_1) & \dots & S_0(t_n) \\ \dots & \dots & \dots \\ S_L(t_1) & \dots & S_L(t_n) \end{matrix}.$$

Выражение для случайной составляющей ошибки прогноза имеет следующий вид:

$$M\ \varepsilon^2(t) = \mathbf{W}^T\mathbf{V}\mathbf{W} - 2\boldsymbol{\beta}^T\mathbf{W} + L^2, \qquad (22)$$

где $\mathbf{W}^T$ – матрица-строка весовых коэффициентов;

**V** симметричная матрица размерности ($n$ x $n$);

$$\boldsymbol{\beta}^T = \beta_1\beta_2...\beta_n \text{ , причем } \beta_j = M[S^0_{sl\inf}S_{sl\inf}(t_j)],$$

$$\text{а } S^0_{sl\inf} = \left.\frac{dS_{sl\inf}(t)}{dt}\right|_{t=t_n+\alpha};$$

$$L = M[S^0_{sl\inf}].$$

Для получения оптимальной функции **W** необходимо минимизировать ошибку, выражение (22), при условии выполнения ограничений (21). Решение целесообразно осуществить способом неопределенных коэффициентов Лагранжа. Результатом является уравнение, задающее искомую функцию модуля прогнозирования:

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}^{-1}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{V}^{-1}\mathbf{S}^T_{sl\inf}[\mathbf{S}_{sl\inf}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{S}^T_{sl\inf}]^{-1}\aleph -$$

$$- \mathbf{V}^{-1}\mathbf{S}^T_{sl\inf}[\mathbf{S}_{sl\inf}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{S}^T_{sl\inf}]^{-1}\mathbf{S}_{sl\inf\mathbf{V}^{-1}}\boldsymbol{\beta}. \qquad (25)$$

## Выводы

Функционирование современной ведомственной или корпоративной мультисервисной сети связи в условиях помех, информационных и других воздействий нарушителей, требует организации непрерывного управления ею.

Эффективность управления МСС заметно повышается, если используется не только текущая информация, но и информация с прогнозом.

Прогнозирование состояния МСС, в плане организации управления, является одним из конкретных видов предсказания, который определяется специфической постановкой задачи и который основывается на математическом аппарате, отражающем существо проблем при проведении процедур прогноза. Особенности, присущие прогнозированию состояния МСС, удобно отразить на фоне известных способов прогноза характеристик технических средств и комплексов, нашедших практическое применение в сетях: прогнозирование ряда эксплуатационных характеристик технического оборудования связи, вычислительных средств, прогнозирование надежностных характеристик.

Форма оператора прогноза зависит от целого ряда принятых допущений и ограничений, а также от объема и конкретного содержания любых дополнительных сведений, которые могут быть использованы в процедурах прогнозирования, а качество оператора – определяться критерием точности прогнозирования, который может быть задан как функция от погрешности прогнозирования, равной разности между действительным значением параметра в определенный момент времени и его оценкой, полученной для этого же момента времени.

Критерием качества предсказания во всех случаях целесообразно выбрать минимум среднеквадратической ошибки. При этом основное внимание следует уделять большим отклонениям, поскольку с математической точки зрения критерий минимума среднеквадратической ошибки является простейшим.

При создании АСУ МСС в контурах управления в рамках специального программного обеспечения закладываются программы, реализующие выбранные способы прогнозирования. И, в зависимости от того или иного вида параметра, для его прогнозирования используют соответствующие ему способы.

## Литература

1. Буренин, А. Н. Теоретические основы управления современными телекоммуникационными сетями / А.Н. Буренин, В.И. Курносов. – М.: Наука, 2011. – 464 с.

2. Belman, R. Mathematical Trends in Control Theory / R. Belman, R. Kalaba. – New York: Dover Publications, 1963. – 273 p.

3. Беллман, Р. Процессы регулирования с адаптацией : [пер. с англ.] / Р. Беллман. – М.: Наука, 1964. – 359 с.

4. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин [и др.]. – М.: Наука, 1969. – 384 с.

5. Гихман, И. И. Введение в теорию случайных процессов / И.И. Гихман, А.В. Скороход. – М.: Наука, 1965. – 655 с.

6. Prabhu, N. U. Stochastic Processes: Basic Theory and its Applications / N.U. Prabhu. – New York: Macmillan, 1965. – 347 p.

7. Карлин, С. Основы теории случайных процессов : [пер. с англ.] / С. Карлин. – М.: Мир, 1971. – 658 с.



2 2021.indd 65 06.07.2021 20:24:05