

## ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

С. А. Рафалович, Д. Ю. Прокофьев, В. О. Лоткин, В. Н. Задорожный (Омск)

Транспортный детектор представляет собой устройство, основной функцией которого является определение интенсивности потока транспортных единиц (ТЕ), проходящих через поперечное сечение дороги за единицу времени. Полученные результаты измерений интенсивности потоков ТЕ используются для рациональной организации дорожного движения и оптимизации транспортной сети [1, 2].

В статье решается задача, которая возникла в ходе проектирования детектора, использующего общую линию связи для асинхронной передачи данных от нескольких периферийных устройств (ПУ). Передача данных по одной линии связи позволяет существенно снизить стоимость системы и повысить ее надежность за счет исключения слабого звена – микроконтроллера, организующего синхронный режим передачи. Детектор состоит из периферийных устройств (ПУ), закапываемых под дорожный асфальт, центрального процессорного устройства (ЦУ) и канала связи и может иметь несколько конфигураций, отличающихся друг от друга только количеством ПУ (обычно в пределах от 1 до 24).

### Постановка задачи

Данные от ПУ передаются по трехпроводному каналу связи [2]: информационный сигнал и питание передаются по двум разным проводам, третий провод – общий провод источника питания (земля). Структурная схема детектора с  $N$  периферийными устройствами приведена на рис. 1.

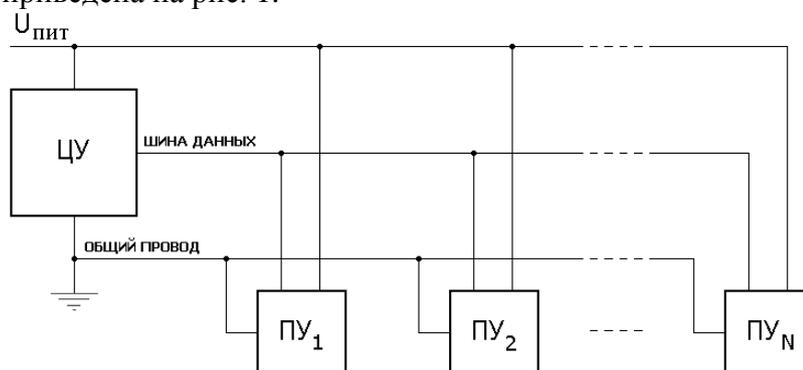


Рис. 1. Структурная схема детектора с асинхронной передачей данных

Каждое ПУ <sub>$i$</sub>  ( $i = \overline{1, N}$ ) содержит измерительный преобразователь и формирователь импульсов. Измерительный преобразователь осуществляет преобразование некоторой неэлектрической величины, сигнализирующей о прохождении ТЕ над ПУ <sub>$i$</sub> , в напряжение постоянного тока, а формирователь импульсов осуществляет преобразование этого напряжения в два регистрирующих импульса и их передачу в ЦУ. В момент входа ТЕ в зону, контролируемую ПУ <sub>$i$</sub> , передается короткий импульс длительностью  $a_i \mu\text{s}$  (рис. 2), в момент выхода ТЕ из зоны ПУ <sub>$i$</sub>  – более длительный ( $b_i \mu\text{s}$ ). Интервал  $x$  между двумя регистрирующими импульсами представляет собой случайную величину (сл. в.), определяемую габаритами ТЕ и скоростью движения. Интервал  $\tau$  между парами регистрирующих импульсов (т. е. между последовательными прохождениями ТЕ) также случайный. Эмпирические распределения вероятностей для сл.в.  $x$ ,  $\tau$  известны. Их математические ожидания  $\bar{x}$ ,  $\bar{\tau}$  могут на разных участках транспортной сети варьироваться в широких пределах.

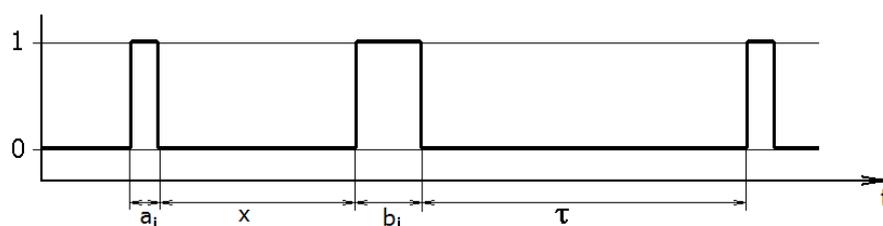


Рис. 2. Последовательность регистрирующих импульсов ПУ

Значения параметров  $a_i$  и  $b_i$  фиксированы и в разных ПУ различны. По этим параметрам ЦУ определяет, из какого ПУ поступают регистрирующие импульсы.

При асинхронной передаче возникает проблема взаимного наложения импульсов, передаваемых различными ПУ. Необходимо, чтобы вероятность  $P$  потери импульса вследствие наложений не превышала некоторой пороговой величины  $P_{\max}$ , определяемой требованиями к точности детектора и возможностями программной коррекции ошибок, осуществляемой в ЦУ. Задача определения вероятности  $P$  решается средствами аналитико-имитационного моделирования.

#### Имитационное моделирование транспортного детектора

При определении вероятности  $P$  потери импульса исходными данными являются значения  $\bar{x}$ ,  $\bar{\tau}$ ,  $a_i$ ,  $b_i$ , ( $i = 1, N$ ). В рассматриваемом ниже примере имитационного моделирования детектора с 2 ПУ используются следующие параметры:

$$a_i \in \{2.0, 2.2\} (\mu s); \quad b_i \in \{8.0, 8.2\} (\mu s).$$

Имитационная модель, написанная для вычисления  $P$  на языке GPSS World, приведена на рис. 3 (для конфигурации с двумя ПУ). Чтобы гарантировать приемлемую точность результатов моделирования (на уровне относительной ошибки 1-3%), в модели через каждое ПУ пропускалось более 1 млн. транзактов, изображающих ТЕ. Время выполнения имитационного эксперимента на персональном компьютере средней мощности (с тактовой частотой около 2 ГГц) при  $N = 2, 3, \dots, 6$  составило, соответственно, 52 с, 87 с, 123 с, 285 с и 427 с.

Зависимость затрат времени от  $N$  приблизительно квадратичная: пропорционально  $N$  увеличивается число имитируемых событий (проходящих ТЕ), и примерно пропорционально  $N$  возрастает время имитации каждого прохождения ТЕ (вследствие увеличения числа проверок, необходимых для обнаружения наложений сгенерированных импульсов с импульсами других ПУ). Уравнение регрессии, построенное по опытам с  $N = 2, 3, \dots, 6$  для оценки затрат компьютерного времени  $T_M$  в зависимости от  $N$ , имеет вид:

$$T_M(N) = 24,286 \cdot N^2 - 99,486 \cdot N + 155,6 \text{ (с)}. \quad (1)$$

Для определения «жизнеспособности» проектируемого асинхронного детектора требуется проверить выполнение условия  $P \leq P_{\max}$  при  $N = 1, 2, \dots, 24$ . С помощью уравнения (1) не трудно подсчитать общее необходимое для этого время. Оно составляет около 26 ч.

```

* Основные обозначения:
* T1_1 - длительность импульса а в ПУ1
* T1_2 - длительность импульса b в ПУ1
* X$P_NLJ - вероятность искажения импульса
* X$NLJ_1 - число искаженных импульсов в ПУ1
* X$NLJ_2 - число искаженных импульсов в ПУ2
* -----
* BLOCK 1 -----
T1_1 EQU 120
T1_2 EQU 1100
GENERATE , ,0.1,1
LB1_1 SAVEVALUE A_1,1
SAVEVALUE PU1_MACHINE+,1
SAVEVALUE NLJ_1+,X$A_2
ADVANCE 0.002
SAVEVALUE A_1,0
ASSIGN 1,(NORMAL(1,500,T1_1))
ADVANCE (P1#(P1>0))
SAVEVALUE A_1,1
SAVEVALUE NLJ_1+,X$A_2
ADVANCE 0.008
SAVEVALUE A_1,0
ASSIGN 1,(NORMAL(1,8000,T1_2))
ADVANCE (P1#(P1>0))
TRANSFER ,LB1_1

* BLOCK 2 -----
T2_1 EQU 120
T2_2 EQU 1100
GENERATE , ,0.1,1
LB2_1 SAVEVALUE A_2,1
SAVEVALUE PU2_MACHINE+,1
SAVEVALUE NLJ_2+,X$A_1
ADVANCE 0.0022
SAVEVALUE A_2,0
ASSIGN 1,(NORMAL(1,500,T2_1))
ADVANCE (P1#(P1>0))
SAVEVALUE NLJ_2+,X$A_1
SAVEVALUE A_2,1
ADVANCE 0.0082
SAVEVALUE A_2,0
ASSIGN 1,(NORMAL(1,8000,T2_2))
ADVANCE (P1#(P1>0))
TRANSFER ,LB2_1

* TIMER -----
GENERATE 100000000
SAVEVALUE P_NLJ,((X$NLJ_1 + X$NLJ_2)/(2*(X$PU1_MACHINE + X$PU2_MACHINE)))
TERMINATE 1

```

Рис. 3. Текст модели на GPSS World для двух ПУ

### Аналитико-имитационное моделирование

Задачи, решаемые при проектировании детектора, не сводятся только к упомянутым в п. 3 проверкам. Они включают также многовариантный анализ, связанный с определением предельных допустимых значений  $\bar{x}$ ,  $\bar{\tau}$  и других параметров, оптимизацией значений  $a_i$  и  $b_i$ , и другие задачи, решение которых путем непосредственного имитационного моделирования повысило бы затраты компьютерного времени еще в десятки раз. В связи с этим, в целях радикального сокращения расходов времени, принято решение использовать комбинированный аналитико-имитационный подход [3].

Нетрудно видеть, что по заданным исходным данным интенсивность  $\lambda_i$  потока транспортных средств через ПУ<sub>i</sub> можно определить по формуле:

$$\lambda_i = \frac{1}{(a_i + b_i) + \bar{x} + \bar{\tau}}. \quad (2)$$

Используя теорему о суммировании большого числа случайных потоков, положим, что суммарный поток передних фронтов всех импульсов, поступающих на общую шину данных, начиная с определенного  $N = N_0$  становится в некотором смысле достаточно близок к пуассоновскому потоку. Тогда при  $N \geq N_0$  можно использовать формулу, определяющую в виде  $\lambda T$  среднее число попадающих в интервал  $T$  событий ( $\lambda$  – параметр пуассоновского потока). С учетом сказанного для расчета вероятности  $P$  при  $N \geq N_0$  выведено следующее приближение:

$$P \cong \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (a_j + b_j), \quad (3)$$

где  $\lambda_i$  определяется формулой (2).

На рис. 4 приводятся результаты аттестации приближения (3), из которых видно, что оно может применяться при  $N \geq 6$  с точностью, соответствующей точности имита-

ционного моделирования. Скорость убывания погрешности с ростом  $N$  показывает, что при  $N > 6$  точность формулы (3) становится более высокой, чем точность имитационного моделирования (при используемых в модели установках).

Время расчета всех 24 вариантов по формуле (3) составило долю секунды, т. е. аналитико-имитационный подход позволил сократить его приблизительно на 5 порядков. Примерно в таком же соотношении сократятся затраты времени при решении многовариантных задач, в том числе задач оптимизации, аналитическими или численными методами, использующими (3), (2).

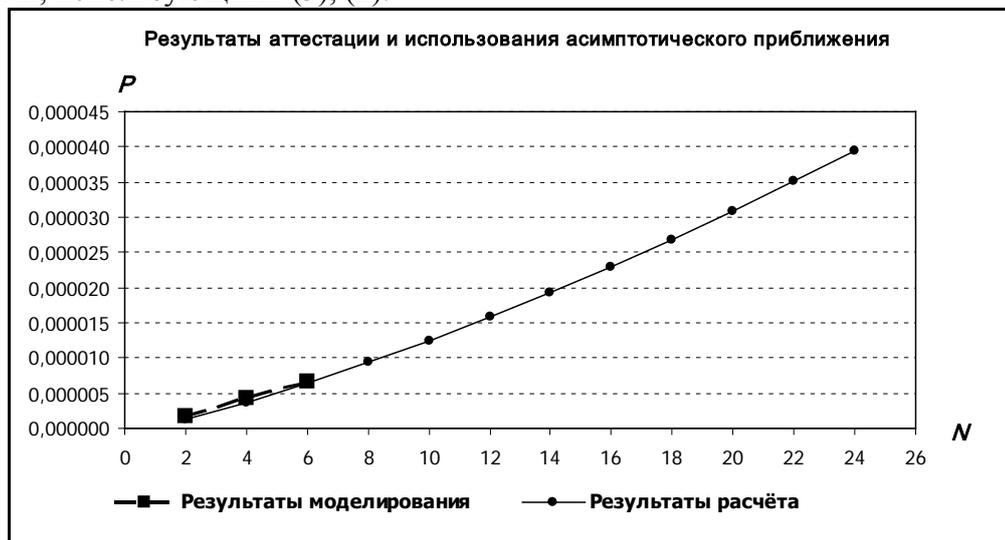


Рис. 4. Аттестация асимптотического приближения для числа ПУ  $N \geq 6$ . При  $N = 2, 4, 6$  относительные погрешности расчета составили (-29%), (-14%) и (-4%) соответственно

### Выводы

В статье изложен метод и практический пример применения комбинированного аналитико-имитационного моделирования в задачах проектирования асинхронных транспортных детекторов. Метод позволяет на несколько порядков сократить затраты компьютерного времени на решение задач многовариантного анализа, типичных для проектирования технических систем. В зависимости от диапазона, в котором находятся параметры моделируемого варианта, выбирается использование имитационной модели либо аналитического приближения. Граница между диапазонами определяется путем аттестации аналитического (асимптотического) приближения, состоящей в совместном использовании двух видов моделирования и сравнении получаемых результатов. Метод позволяет сократить затраты компьютерного времени в тысячи раз.

### Литература

1. Мур М., Притски Т., Риггс К., Сауфвик П. Телекоммуникации. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 624 с.
2. Прокофьев Д. Ю., Ищенко С. В. Исследование многоканальных систем связи с временным разделением каналов//Сборник докладов студенческой научно-практической конференции «АСОИУ в УНИРС»: доклады участников научно-практической конференции кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления ОмГТУ, 23–25 апреля 2007 года. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. 69 с.
3. Задорожный В. Н. Комбинированный метод моделирования циклических систем обслуживания//Омский научный вестник. 2006. № 9(46). С. 156–163.