ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С КАНАЛОМ ПОЛНОЙ РЕТРАНСЛЯЦИОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

А. Д. Гринченко, В. В. Свиридов

Харьков

В настоящее время широким фронтом ведутся работы по внедрению средств комплексной автоматизации и электронно-вычислительной техники во все отрасли народного хозяйства нашей страны. При этом значительно возросла роль средств передачи телемеханической информации.

Из экономических соображений в условиях промышленных предприятий для образования каналов телемеханики чаще всего использу-

ются телефонные каналы, высоковольтные линии электропередачи, низковольтные распределительные сети и другие уже имеющиеся линии связи. Известно, что уровень помех в таких линиях связи довольно высок, помехоустойчивость передачи информации по ним низка и не превышает величины порядка 10^{-3}—10^{-4} [1].

Применение ЭВМ выдвигает повышенные требования к средствам передачи телемеханической информации по помехоустойчивости. Наиболее эффективными методами повышения помехоустойчивости до величины порядка $10^{-7} \div 10^{-8}$ являются методы контроля передаваемой информации по обратному каналу [2].

В нашей стране разработан ряд систем телемеханики с каналом обратной связи, однако теоретических исследований в этой области очень мало [3]. Поэтому задача исследования систем с каналом обратной связи является весьма актуальной.

В данной работе исследуется система передачи телемеханической информации с каналом полной ретрансляционной обратной связи, в которой используется число — импульсный код. Следует отметить, что применение ретрансляционной обратной связи требует минимального усложнения аппаратуры, а системы с ретрансляционной обратной связью могут быть легко приспособлены ко многим уже действующим линиям связи.

Алгоритм работы системы следующий. Команда передается числом импульсов, соответствующим номеру команды. При этом используется поэлементный прием. Каждый импульс квитируется и только после подтверждения правильности его приема передается следующий импульс. После подтверждения правильности приема команды передача прекращается. При наличии помех, действующих в прямом и обратном каналах, передаваемые команды могут искажаться, что приводит к появлению обнаруженных и необнаруженных ошибок. При обнаружении ошибки система повторяет передачу данной команды. Максимально допустимое число повторений одной команды равно β_m. При анализе системы предполагается, что синхронизация идеальная, характеристики прямого и обратного каналов идентичны и ошибки в каналах имеют независимый характер.

Мы анализируем систему только в режиме передачи, хотя данную методику можно использовать и для анализа системы в режиме ожидания.

Для оценки помехоустойчивости и эффективности системы при допустимом числе повторений одной команды β_m используются следующие критерии:

1) вероятность появления на диспетчерском пункте зафиксированной обнаруженной ошибки, которая не может быть исправлена, так как число циклов передачи достигло β_m — $P_{оо}(\beta_m)$;

2) вероятность появления хотя бы одной необнаруженной ошибки за число циклов $\beta \leqslant \beta_m$ — $P_{но}(\beta \leqslant \beta_m)$;

3) остаточная вероятность ошибки за $\beta \leqslant \beta_m$ циклов — $P_{ост}(\beta \leqslant \beta_m)$;

4) среднее число циклов передачи, приходящееся на передачу одной команды, — $\beta_{ср}(\beta \leqslant \beta_m)$.

Пусть команда передается двумя импульсами C_1 и C_2, которые имеют одинаковые характеристики и передаются последовательно во времени.

При передаче импульсов по прямому и обратному каналам связи в отдельных тактах передачи возможны следующие исходы: правильная передача импульса — ПР; подавление импульса помехами — П; наведение импульса из помех — Н; отсутствие импульса в данном такте передачи — О. Используя метод парных искажений Г. А. Шастовой [4] и

применяя следующие обозначения для пар событий в прямом и обратном каналах

$$\begin{array}{ll} \text{ПР}-\text{ПР}-a_1, & \text{ПР}-\text{Н}-a_2, \\ \text{П}-\text{О}\ -a_3, & \text{П}-\text{Н}-a_4, \\ \text{О}-\text{О}\ -a_5, & \text{О}-\text{Н}-a_6, \\ \text{Н}-\text{ПР}-a_7, & \text{Н}-\text{П}-a_8, \end{array} \qquad (1)$$

можно получить диаграмму вероятностных переходов.

Анализ диаграммы для случая команды, состоящей из двух импульсов, показывает, что всего 16 исходов, причем правильная передача — в одном исходе, необнаруженные ошибки — в трех исходах, а в остальных двенадцати исходах — обнаруженные ошибки. Подобные диаграммы можно построить для команд, состоящих из трех, четырех и т. д. импульсов.

Анализ этих диаграмм показывает, что правильная передача имеет место при исходе, который представляет собой последовательность событий типа a_1. При исходах, образующих последовательности событий a_1, a_1 в любой комбинации, кроме комбинации, состоящей только из событий a_1, имеют место необнаруженные ошибки, а в остальных случаях — обнаруженные ошибки.

При числе импульсов в команде n число всех исходов $N_и$, число вариантов правильной передачи $N_{пр}$, число исходов с необнаруженными ошибками $N_{но}$ и число исходов с обнаруженными ошибками $N_{оо}$ соответственно равны

$$N_и = 4^n,\ N_{пр} = 1,\ N_{но} = 2^n - 1,\ N_{оо} = 4^n - 2^n. \qquad (2)$$

Результаты табл. 1 показывают, что подавляющее число ошибок, возникающих в системе с ретрансляционной обратной связью, обнаруживается и может быть исправлено, так как при появлении обнаруженных ошибок оператор (машина или человек) повторяет передачу.

Таблица 1

n	1	2	3	4	5
$N_и$	4	16	64	256	1024
$N_{пр}$	1	1	1	1	1
$N_{но}$	1	3	7	15	31
$N_{оо}$	2	12	56	240	992

Оператор работает по следующему алгоритму. При наступлении событий правильной передачи или необнаруженной ошибки передача прекращается, так как оператор считает, что команда передана правильно. Обозначим этот класс событий через A. Разобьем класс событий A на 2 подкласса A' и A'' и отнесем к подклассу A' событие правильной передачи, а к подклассу A'' — события появления необнаруженной ошибки. При наступлении события обнаруженной ошибки оператор повторяет передачу команды. Обозначим класс событий, в результате которых появляются обнаруженные ошибки, через B. Так как события классов A и B образуют полную группу событий, то

$$P_A + P_B = P_{A'} + P_{A''} + P_B = 1, \qquad (3)$$

где P_A, P_B, $P_{A'}$ и $P_{A''}$ — соответственно вероятности наступления событий классов A, B, A' и A'' в первом цикле передачи.

Исходя из изложенного, мы можем определить вероятность правильной передачи $P_{пр}$, вероятность необнаруженной ошибки $P_{но}$ и вероятность обнаруженной ошибки $P_{оо}$ при однократной передаче

$$P_{пр}(1) = P_{A'}, \tag{4}$$

$$P_{но}(1) = P_{A''}, \tag{5}$$

$$P_{оо}(1) = P_B = 1 - P_A = 1 - P_{A'} - P_{A''}. \tag{6}$$

Рассмотрим случай передачи команды, состоящей из трех импульсов, т. е. $n = 3$. В этом случае подкласс событий A' можно представить в виде множества, состоящего из одного элемента

$$A' = \{a_1a_1a_1\}, \tag{7}$$

а подкласс событий A'' в виде множества

$$A'' = \{a_1a_1a_4,\ a_1a_4a_1,\ a_4a_1a_1,\ a_1a_4a_4,\ a_4a_4a_1,\ a_4a_1a_4,\ a_4a_4a_4\}. \tag{8}$$

В общем случае количество элементов множества A'' определяется из (2).

Учитывая (4), (5), (6) и (8), получаем

$$P_{пр}(1) = P^3_{a_1}, \tag{9}$$

$$P_{но}(1) = \sum_{j=0}^{2} C^j_3 P^{3-j}_{a_4} P^j_{a_1}, \tag{10}$$

$$P_{оо}(1) = 1 - \sum_{j=0}^{3} C^j_3 P^{3-j}_{a_4} P^j_{a_1}, \tag{11}$$

где C^j_3 — число сочетаний из 3 по j. Вероятности P_{a_1} и P_{a_4} в соответствии с обозначением (1) равны

$$P_{a_1} = P^2_{пр},\quad P_{a_4} = P_п P_н, \tag{12}$$

где $P_{пр}$, $P_п$ и $P_н$ соответственно вероятности правильной передачи, подавления и наведения импульса в прямом канале.

Обобщая выражения (9), (10) и (11) на случай команды, состоящей из n импульсов, получаем

$$P_{пр}(1) = P^n_{a_1}; \tag{13}$$

$$P_{но}(1) = \sum_{j=0}^{n-1} C^j_n P^{n-j}_{a_4} P^j_{a_1}; \tag{14}$$

$$P_{оо}(1) = 1 - \sum_{j=0}^{n} C^j_n P^{n-j}_{a_4} P^j_{a_1}. \tag{15}$$

Вероятности $P_{оо}(\beta_m)$, $P_{но}(\beta \leqslant \beta_m)$, $P_{ост}(\beta \leqslant \beta_m)$ и среднее число циклов передачи одной команды $\beta_{ср}(\beta \leqslant \beta_m)$ выражаются через вероятность появления события класса A за число циклов $\beta \leqslant \beta_m$ $P_A(\beta \leqslant \beta_m)$ и вероятность появления события класса B в последнем цикле $P_B(\beta_m)$, которые выражаются следующим образом:

$$P_A(\beta \leqslant \beta_m) = \sum_{\beta=1}^{\beta_m} P^{\beta-1}_B P_A; \tag{16}$$

$$P_B(\beta_m) = P^{\beta_m}_B. \tag{17}$$

Чтобы получить вероятность необнаруженной ошибки за число циклов $\beta \leqslant \beta_m$, необходимо в выражение (16) вместо вероятности P_A подставить вероятность $P_{A''}$. Тогда получим

$$P_{но}(\beta \leqslant \beta_m) = \sum_{\beta=1}^{\beta_m} P^{\beta-1}_B P_{A''}, \tag{18}$$

Вероятность обнаруженной ошибки по истечении числа циклов β_m

$$P_{oo}(\beta_m) = P_B(\beta_m), \tag{19}$$

а остаточная вероятность ошибки в системе равна

$$P_{ост}(\beta \leqslant \beta_m) = P_{но}(\beta \leqslant \beta_m) + P_{oo}(\beta_m). \tag{20}$$

И, наконец, среднее число циклов, приходящееся на передачу одной команды,

$$\beta_{ср}(\beta \leqslant \beta_m) = M[\beta] = \beta P_{оп}(\beta), \tag{21}$$

где $P_{оп}(\beta)$ — вероятность окончания передачи команды за β циклов

$$P_{оп}(\beta) = P_A(\beta \leqslant \beta_m) + P_B(\beta_m). \tag{22}$$

После подстановки в (21) выражений (22), (16), (17) и соответствующих преобразований получаем

$$\beta_{ср}(\beta \leqslant \beta_m) = \sum_{t=0}^{\beta_m - 1} P_B^t. \tag{23}$$

Число — импульсный код является неравномерным, поэтому $P_{но}(\beta \leqslant \beta_m)$, $P_{00}(\beta_m)$, $P_{ост}(\beta \leqslant \beta_m)$ и $\beta_{ср}(\beta \leqslant \beta_m)$ для всех команд различны. Кроме того, вероятности передачи отдельных команд p_k могут быть неодинаковыми. Поэтому для определения средних по всем командам $\overline{P}_{но}$, $\overline{P}_{oo}$, $\overline{P}_{ост}$ и $\overline{\beta}_{ср}(\beta \leqslant \beta_m)$ необходимо воспользоваться формулами

$$\overline{P}_{но}(\beta \leqslant \beta_m) = \sum_{k=1}^{N} p_k \sum_{\beta=1}^{\beta_m} P_B^{\beta-1} P_A; \tag{24}$$

$$\overline{P}_{oo}(\beta_m) = \sum_{k=1}^{N} p_k P_B^{\beta_m}; \tag{25}$$

$$\overline{P}_{ост}(\beta \leqslant \beta_m) = \overline{P}_{но}(\beta \leqslant \beta_m) + \overline{P}_{oo}(\beta_m); \tag{26}$$

$$\overline{\beta}_{ср}(\beta \leqslant \beta_m) = \sum_{k=1}^{N} p_k \sum_{t=0}^{\beta_m - 1} P_B, \tag{27}$$

где N — число команд.

По формулам (14), (15), (18), (19), (20) и (23) рассчитывали помехоустойчивость и эффективность исследуемой системы. Расчеты были проведены в предположении, что передача телемеханической информации осуществляется видеоимпульсами по двоичному симметричному каналу с флуктуационными помехами, а для приема видеоимпульсов используют импульсный приемник с приемом «в точке» [4].

Результаты расчетов представлены в табл. 2, 3, 4. В табл. 2 даны зависимости вероятностей обнаруженной ошибки и вероятности необнаруженной ошибки от α при однократной передаче для кодовых комбинаций, имеющих различную длительность, где $\alpha = \frac{\alpha_0}{\sqrt{2}}$, а α_0 — корень квадратный из отношения энергии элементарного импульса команды к удельной мощности помех в канале связи. Из приведенной таблицы видно, что $P_{oo}(1)$ и $P_{но}(1)$ существенно зависят от длительности команды и могут изменяться примерно на порядок во всем диапазоне изменения α при изменениях n от единицы до двадцати.

В табл. 3 даны зависимости $P_{oo}(\beta_m)$, $P_{но}(\beta \leqslant \beta_m)$ и $P_{ост}(\beta \leqslant \beta_m)$ от α для n равно 20 при изменении β_m от 1 до 4. Полученные зависимости показывают, что вероятность необнаруженной ошибки при $\alpha > 3$ не зависит, а вероятность обнаруженной ошибки во всем диапазоне

изменения α существенно зависит от допустимого числа повторений команды β_m. Для данного уровня помех и требуемой достоверности передачи информации по зависимости остаточной вероятности $P_{ост}(\beta \leqslant \beta_m)$ полученные результаты позволяют выбрать оптимальное число повторений команды $\beta_{m\,опт}$.

Таблица 2

	α \ n	1	3	5	10	20
$P_{\infty}(1)$	1	0,267	0,606	0,815	0,953	0,988
	2	$4{,}46\cdot10^{-2}$	$1{,}29\cdot10^{-1}$	$2{,}05\cdot10^{-1}$	$3{,}69\cdot10^{-1}$	$6.02\cdot10^{-1}$
	3	$2{,}7\cdot10^{-3}$	$8{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}35\cdot10^{-2}$	$2{,}7\cdot10^{-2}$	$5.4\cdot10^{-2}$
	4	$6{,}34\cdot10^{-5}$	$1{,}9\cdot10^{-4}$	$3{,}17\cdot10^{-4}$	$6{,}34\cdot10^{-4}$	$1{,}26\cdot10^{-3}$
	5	$5{,}74\cdot10^{-7}$	$1{,}72\cdot10^{-6}$	$2{,}87\cdot10^{-6}$	$5{,}74\cdot10^{-6}$	$1{,}15\cdot10^{-5}$
$P_{но}(1)$	1	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$3{,}88\cdot10^{-2}$	$3{,}35\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$1{,}08\cdot10^{-2}$
	2	$5{,}14\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-3}$	$2{,}13\cdot10^{-3}$	$3{,}39\cdot10^{-3}$	$4{,}77\cdot10^{-3}$
	3	$1.82\cdot10^{-6}$	$5{,}46\cdot10^{-6}$	$9{,}1\cdot10^{-6}$	$1{,}82\cdot10^{-5}$	$3{,}64\cdot10^{-5}$
	4	10^{-9}	$3\cdot10^{-9}$	$5\cdot10^{-9}$	10^{-8}	$2\cdot10^{-8}$
	5	$8{,}2\cdot10^{-14}$	$2{,}46\cdot10^{-13}$	$4{,}1\cdot10^{-13}$	$8{,}2\cdot10^{-13}$	$1{,}64\cdot10^{-12}$

Таблица 3

	β_m \ α	1	2	3	4	5
$P_{ост}(\beta_m)$	1	0.988	$6.02\cdot10^{-1}$	$5{,}4\cdot10^{-2}$	$1{,}26\cdot10^{-3}$	$1\ 15\cdot10^{-5}$
	2	0.976	$3{,}6\cdot10^{-1}$	$2{,}9\cdot10^{-3}$	$1{,}58\cdot10^{-6}$	$1{,}32\cdot10^{-10}$
	3	0.964	$2{,}2\cdot10^{-1}$	$1.66\cdot10^{-4}$	$2\cdot10^{-9}$	$1{,}52\cdot10^{-15}$
	4	0.952	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$8.4\cdot10^{-6}$	$2.48\cdot10^{-12}$	$1.74\cdot10^{-20}$
$P_{но}(\beta \leqslant \beta_m)$	1	$1.08\cdot10^{-2}$	$4{,}77\cdot10^{-3}$	$3.64\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-8}$	$1{,}64\cdot10^{-12}$
	2	$2{,}15\cdot10^{-2}$	$7{,}63\cdot10^{-3}$	$3{,}83\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-8}$	$1{,}64\cdot10^{-12}$
	3	$3{,}2\cdot10^{-2}$	$9{,}35\cdot10^{-3}$	$3{,}94\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-8}$	$1{,}64\cdot10^{-12}$
	4	$4{,}23\cdot10^{-2}$	$1.04\cdot10^{-2}$	$3{,}98\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-8}$	$1{,}64\cdot10^{-12}$
$P_{ост}(\beta_m)$	3	0.996	0.23	$2.05\cdot10^{-4}$	$2.02\cdot10^{-8}$	$1.64\cdot10^{-12}$

Таблица 4

	n	β_m \ α	1	2	3	4	5
$\beta_{ср}\ (\beta \leqslant \beta_m)$	5	2	1.815	1.205	1.013	1,000	1.000
		3	2.479	1.247	1.013	1.000	1.000
		4	2.92	1.255	1.013	1.000	1.000
	20	2	1,988	1.982	1,602	1,054	1,001
		3	2,964	2.943	1.964	1,083	1,001
		4	3.928	3.887	2,182	1,099	1.001

Из табл. 4 видно, что система с использованием число-импульсного кода и каналом полной ретрансляционной обратной связи обладает высокой эффективностью, так как при $\alpha > 3$ среднее количество циклов передачи одной команды $\beta_{ср}\,(\beta \leqslant \beta_m) = 1$ и не зависит от допустимого числа повторений команды β_m и числа импульсов в команде n.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что система передачи телемеханической информации с использованием число-импульсного кода и каналом полной ретрансляционной обратной связи способна обеспечить высокие показатели по помехоустойчивости и эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Шастова, В. М. Помазан. Современное состояние и тенденции развития теории помехоустойчивости передачи телемеханической информации. Труды Научно-технического общества радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова, секция 23, 1967.

2. К. А. Смирнов. Построение систем передачи данных с информационной обратной связью. Изд-во «Транспорт», 1965.

3. В. М. Помазан. Использование методов обратного канала для повышения помехоустойчивости адресных методов передачи телемеханической информации управления. «Теория и средства автоматики». Изд-во «Наука», 1968

4. Г. А. Шастова. Кодирование и помехоустойчивость передачи телемеханической информации. Изд-во «Энергия», 1966.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ МОМЕНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ

А. В. Луговой

Кривой Рог

Технико-экономические показатели электродвигателей при переменной нагрузке зависят от принятого закона изменения электромагнитного момента. Правильно выбранный закон позволяет уменьшить мощность двигателя, потери, повысить производительность агрегата. Одним из наиболее распространенных случаев переменной нагрузки является ударная нагрузка, при которой используются электродвигатели постоянного тока (главные приводы реверсивных и регулируемых нереверсивных прокатных станов) и переменного тока (главные приводы нерегулируемых прокатных станов и привода преобразовательных агрегатов). Двигатели переменного тока используются в установках, где не требуется регулирования скорости. В таких условиях применяется регулирование мощности, позволяющее сгладить удары нагрузки. При этом уменьшаются необходимая мощность двигателя, потери в двигателе и сети и по-