

На правах рукописи

Нэисабйра Нехема
(Бурунди)

УДК 621.391; 621.396; 621.382 (024)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ СВЯЗИ С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ
ЭЛЕМЕНТА МЕНЬШЕ НАЙКВИСТОВОГО

05.12.02 -- Системы и устройства передачи
информации по каналам связи

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса 1999

7В а 27.000
Работа выполнена в Одесском электротехническом институте
связи им. А.С.Попова

- Научный руководитель - академик Академии связи Украины,
доктор технических наук,
профессор ЗАХАРЧЕНКО Н.В.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ИЗАНИЙКОЙ А.М.
- кандидат технических наук,
доц. КОВАЛЬ Е.А.

Ведущее предприятие: СНИО, г. Одесса.

Защита состоится "08" октября 1993 г.
в 10.00 часов на заседании Специализированного совета
К 118.05.01 Одесского электротехнического института связи
им. А.С.Попова по адресу: 270021, Одесса-21, ул. Челюскинцев, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "18" августа 1993 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
кандидат технических наук,
профессор

П.П.ВОРОБИЕНКО

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00753984 (-)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и состояние вопроса. Одной из первоочередных задач социально-экономической программы страны до 2000 года, в плане создания инфраструктуры, является развитие и совершенствование сетей электросвязи. При этом наряду с увеличением ресурсов сетей значительная роль отводится повышению эффективности их использования.

На протяжении последних десятилетий советскими и зарубежными учеными были достигнуты большие успехи в разработке новых вариантов кодирования и формирования сигналов, что позволило в современных системах передачи (СП) повысить степень использования пропускной способности линейных трактов и увеличить удельную скорость передачи до 3...4 бит/с - Гц. Реализация этих теоретических результатов в построении аппаратуры СП позволяет увеличить число каналов связи.

В создание и развитие систем передачи информация существенный вклад внесли советские ученые В.В.Котельников, Б.Б.Тимофеев, Р.А.Алиев, В.М.Глушков, Л.Ф.Флик, А.Д.Харкевич, Б.Н.Малиновский, Л.П.Пуртов, Б.Р.Левин, А.Г.Эюко, В.О.Шварцман, А.А.Воронин, А.М.Александров, А.М.Дучук, В.А.Игнатов, В.П.Шувалов, Н.В.Захарченко, В.И.Николаев, В.Л.Банкет, Г.П.Захаров, Е.В.Бойченко, В.В.Шахгельян, Л.Б.Варакин, Л.А.Колчинченко, зарубежные специалисты в области связи К.Шеннон, Р.Фано, Н.Витгер, Дж.Возенкрефт, Ф.Куо, М.Джерли, Р.Байлер и др.

Повышение эффективности использования каналов связи реализуется в большинстве случаев за счет применения многопозиционных сигналов: многосуровневных, многочастотных, с большим числом фаз сигнала. Однако более 50% каналов существующих сетей являются двоичными. Для этих каналов многопозиционные сигналы неприменимы. Увеличить пропускную способность в таких каналах можно применяя сверхвысокоскоростную модуляцию или уплотнение на единичном интервале (многопозиционные временные сигналы). Сверхвысокоскоростная скорость модуляции рассматривается в работах С.Н.Балеза, В.О.Хабарова, Д.Д.Кловского, Б.И.Николаева, К.А.Бельфлора, Дж.Парка. Одной из центральных проблем при такой передаче является влияние межсимвольных искажений на качество приема. При использовании многопозиционных временных сигналов межсимвольные искажения можно существенно уменьшить. В связи с этим в данной работе автор развивает идеи, изложен-

ние в работах Н.В.Захарченко, И.А.Киреева, Э.В.Дельгадо, М.И.Мариновой, Г.Я.Панченко и др.

При разрядно-цифровом способе кодирования (РЦК) на интервале двоичных элементов t_0 реализуется $N_p = 2^m$ кодовых слов, отличающихся, по крайней мере, одним элементом. В реферируемой работе повышение эффективности достигается за счет нового подхода к формированию сигналов передаваемых байтов - создания на интервале $T_0 = m t_0$ числа реализаций составных сигналов $N_p > 2^m$ с минимальным отличием на величину $\Delta = t_0 / S$ ($S \in 1, 2, 3, \dots$). При этом, с целью уменьшения межсимвольных искажений (МСИ), возникающих за счет неэквидистантного расположения значащих моментов модуляции (ЗММ), минимальное расстояние между ЗММ (τ_c) выбирается большим либо равным длительности наименьшего элемента t_0 .

Так как ЗММ могут занимать S положений на интервале времени единичного элемента $t_0 = 1/\Delta F_k$ (где ΔF_k - ширина полосы пропускания канала), то формируемые таким способом сигналы получили название многопозиционных временных сигналов (МВС), а коды - временных кодов (МВК). Для таких сигналов доказано, что разрешенное множество является нелинейным, поэтому известные для РЦК методы формирования избыточных элементов для обнаружения или исправления ошибок при МВС неприменимы.

Таким образом для решения вопросов целесообразности и эффективности использования сигналов с базовым элементом меньше найквистового в работе решаются следующие вопросы:

- определены предельные значения пропускной способности в обоих случаях;
- определена степень повышения вероятности ошибки;
- оценена возможность использования прироста пропускной способности для обеспечения заданного качества передачи;
- решены вопросы формирования оптимальных сигнальных конструкций при использовании анализируемых сигналов;
- построены алгоритмы работы систем и устройств на базе сигналов МВС.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является сравнение различных алгоритмов формирования сигнальных конструкций с базовым элементом меньше найквистового.

При этом решаются следующие задачи:

- определена мощность межсимвольных искажений при сверхнайквистовой скорости передачи;

- произведена оценка эффективности использования прироста пропускной способности при сверхнайквистовой скорости передачи для обеспечения заданного качества передачи;

- найдены оптимальные характеристики тракта, минимизирующие МСИ;

- произведено сравнение избыточных многопозиционных временных сигналов с групповой защитой по модулю и защитой отдельных значащих моментов модуляции;

- рассмотрены вопросы формирования и защиты отдельных кадров при МЭС и различных протоколах.

Методы исследования. При разработке сигнальных конструкций на базе многопозиционных временных сигналов использовались теория множеств, комбинаторика, теория многопозиционного кодирования.

При решении вопросов оценки отдельных алгоритмов передачи использовалась теория помехоустойчивости, методы математической статистики и случайных процессов.

Научная новизна. В работе получены следующие научные результаты:

- получено аналитическое выражение, связывающее коэффициенты превышения найквистовой скорости с мощностью МСИ;

- построены зависимости вероятности ошибочного приема при анализе посылки в средней части от мощности помех при постоянном коэффициенте превышения найквистовой скорости;

- установлены связи между параметрами избыточных МБК с групповой защитой и кратностью исправляемых или обнаруживаемых ошибок;

- определена вероятность ошибочного приема сигнальной конструкции МЭС с постоянным числом ЗММ;

- определены параметры множеств сигналов с защитой отдельных ЗММ;

- определены параметры систем при протоколах с блочной защитой.

Практическая ценность результатов работы. Полученные в работе аналитические выражения для мощности МСИ при работе "быстрого Найквиста", виды характеристик, минимизирующих дисперсию межсимвольных помех, позволяют определить границы применимости элементарного приема при передаче "быстрого Найквиста".

Полученные формулы для параметров избыточных МБК с групповой защитой позволяют реализовать МБК с различным числом значащих моментов модуляции.

Построенные графические зависимости мощности МСИ от степени превышения "найквистовой" скорости позволяют производить оценку вероятности приема сигнальных конструкций МВС.

Предложенные алгоритмы систем передачи данных позволяют повышать эффективную скорость передачи в протоколах канального уровня.

Реализация результатов работы. Полученные в работе выводы и алгоритмы используются в научно-исследовательской работе кафедры ПДС "Повышение эффективности использования каналов связи".

Апробация работы. Основные теоретические и практические результаты работы докладывались на научном семинаре кафедры передачи дискретной информации ОЗИС им. А.С.Попова.

Публикации. По теме диссертации написано две научные работы.

Вклад автора. Основные научные положения, теоретические выводы и рекомендации получены автором самостоятельно.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Работа содержит 132 страниц, в том числе 109 страниц текста, 23 страниц рисунков, 7 страниц библиографии из 85 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические выражения МСИ при работе со сверхнайквистовой скоростью модуляции.
2. Оценка эффективности использования прироста скорости передачи для повышения качества приема.
3. Характеристики тракта передачи минимизирующих МСИ.
4. Аналитические выражения связывающие избыточность МВС с вероятностью необнаруженной ошибки в сигнальной конструкции.
5. Аналитические выражения для вероятности необнаруженной ошибки в сигнальной конструкции МВС.
6. Алгоритмы передачи информации при блочной защите и протоколах канального уровня.

Содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность проводимых исследований, раскрывается состояние вопроса, формулируется цель работы, приводится краткое содержание и основные научные и практические результаты.

В первой главе диссертации провоятся критерий оценки систем связи и формируются задачи исследования данной работы. Все критерии оценки разделены на две группы: информационно-технические критерии /дальности связи, помехоустойчивости связи, скрытность связи, секретность связи, скорость передачи информации, пропускная способность канала связи и эффективность связи/ и конструктивно-эксплуатационные критерии, характеризующие вторичные параметры систем связи /объем аппаратуры, вес аппаратуры, эксплуатационная надежность, гибкость системы связи и экономическая стоимость/. Определена область применимости отдельных критериев при проектировании систем связи. Особое внимание уделено информационным ресурсам систем связи. Определены методы повышения их для различных каналов связи. Приведен обзор литературы по методам повышения эффективности систем связи. Определена область применимости МСВ и дана оценка методов увеличения передачи в двоичных каналах.

Во второй главе диссертации приведен анализ параметров межсимвольных искажений при скоростях "выше" и "ниже" Найквистовой. Рассматриваются основные вопросы, связанные с наличием МСВ, порожденной сверхнайквистовой скоростью передачи информации.

В работе показано, что если канал связи обладает передаточной функцией "идеального фильтра нижних частот" /ФНЧ/, для которого амплитудно-частотная характеристика /АЧХ/ описывается выражением:

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \pi \\ 0, & |\omega| > \pi \end{cases} \quad (11)$$

то при подаче на вход идеального канала служебной последовательности

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \delta(t - kT) \quad (12)$$

где a_k , $k = 0, \pm 1, \dots$, - информационные символы, δ - дельта функция.

Мощность МСВ описывается выражением:

$$\begin{aligned} \sigma_{МСВ}^2 &= \frac{(1 - \pi/\Omega)^2}{2\Omega} \int_0^{\Omega} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega - p2\pi}{2\Omega}\right)^2} d\omega + \\ &+ \frac{1}{\pi 2\Omega} \int_{-\Omega}^{\Omega} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega - p2\pi}{2\Omega}\right)^2} d\omega \end{aligned} \quad (13)$$

где λ_0 - среднее число пересечения нулевого уровня в единицу времени; Ω - ограниченная полоса пропускания канала / $\Omega < \mathcal{P}$ /.
 Спрделена зависимость P_2 от P_3^* /рис. 1/, где P_3^* - эквивалентная вероятность ошибки с учетом межсимвольной помехи из-за сверхнаивистой скорости передачи. Далее, приведена оценка целесообразности работы со скоростями "выше Найквиста". При работе со сверхнаивистой скоростью уменьшается время передачи единичного элемента, что позволяет получить, например, при $M = 1,4$, $N = 14$ вместо 10 в том же интервале T / M - относительное превышение скорости/. Возникает вопрос. Достаточно ли этих 4-х избыточных элементов для повышения эффективности системы передачи, чтобы $P_{20} \leq P_{20\text{мин}}$. Для случая независимых ошибок, когда

$$P_{20} \approx \frac{1}{2^r} \sum_{i=d}^n C_n^i P_3^i (1 - P_3)^{n-i} \quad /4/$$

/ r - число проверочных разрядов кода, d - минимальное кодовое расстояние/ показано, что при $M = 1,4$ можно получить код $r = 4$, $R = n - r = 10$, $d_{\text{мин}} = 3$, а вероятность необнаруженной ошибки

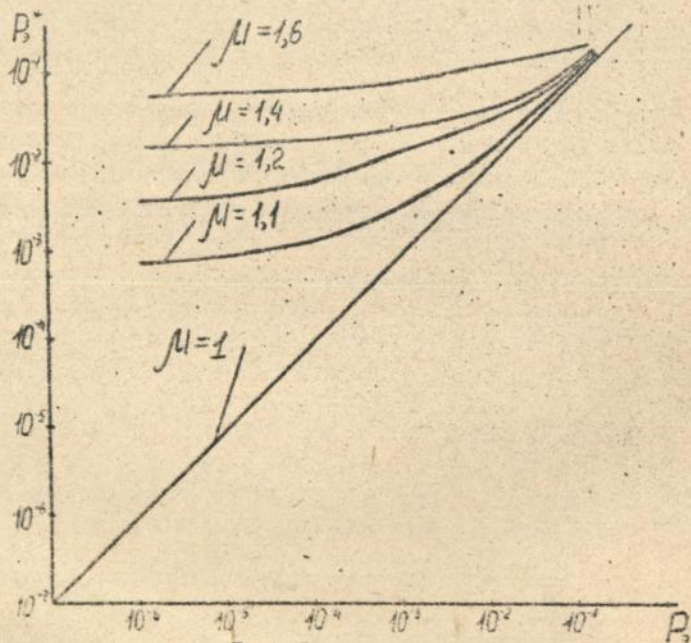


Рис. 1

составляет

$$P_{\text{н0}} \approx \frac{1}{2^4} \sum_{i=3}^{14} C_{14}^i (1,5 \cdot 10^{-4})^i \cdot (1 - 1,5 \cdot 10^{-4})^{14-i} = 0,213 \cdot 10^{-4}$$

что больше $P_{\text{н0}}^{\text{нз}}$ для найквистовой скорости.

В заключении главы отмечено, что для бинарного канала при когерентном приеме нецелесообразно работать со скоростью "выше" Найквиста, так как повышение пропускной способности существенно влияет на вероятность искажения сигналов. В связи с этим рассмотрен способ оптимизации передаточной функции с целью уменьшения МСМ. В предположении, что информация последовательности $\{a_n\}_{n=-\infty}^{\infty}$ представляет собой отсчеты случайного телеграфного сигнала, принимающего с равной вероятностью два возможных значения ± 1 и обладающего функцией автокорреляции $B(t) = e^{-2\lambda_0 t}$, $-\infty < t < \infty$, λ_0 - среднее число пересечения нулевого уровня в единицу времени. Полагая спектр плотности мощности шума равным нулю, найдено выражение для оптимальной передаточной функции и мощности МСМ.

$$H_{\text{2opt}} = 1 - \frac{\Omega - \pi}{\int_0^{\Omega} \frac{d\nu}{\sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{\nu - p2\pi}{2\lambda_0}\right)^2}} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega - q2\pi}{2\lambda_0}\right)^2}} \quad /5/$$

Для оптимальной передаточной функции значение мощности МСМ равно:

$$G_{\text{min}}^2 = \frac{(\Omega - \pi)^2}{\pi \lambda_0 \int_0^{\Omega} \frac{d\omega}{\sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega - p2\pi}{2\lambda_0}\right)^2}}} + \frac{1}{\pi \lambda_0} \int_{\Omega}^{\pi} \frac{1}{\sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega - p2\pi}{2\lambda_0}\right)^2}} d\omega \quad /6/$$

В последней части главы анализируется эффективность приема при обработке по алгоритму Витерби.

В третьей главе рассмотрены принципы формирования многопозиционных временных сигналов и созданных на их основе многопозиционных временных кодов. Получено аналитическое выражение для потери в канале за счет неопределенности в приеме кодовой сигнальной конструкции:

$$H_n = - \left[P_B \log_2 P_B + (1 - P_B) \log_2 \frac{1 - P_B}{N_{PE} - 1} \right] \quad /7/$$

$$P_B = \left[\Phi \left(\frac{\Delta}{2\sigma} \right) \right]^{\bar{n}} \quad /8/$$

/ P_B - вероятность правильного приема сигнальной конструкции /.

Показано, что для кодов с переменным числом переходов среднее число их равно:

$$\bar{n} = \sum_{n=1}^m \frac{n C_{ms-n}(s-1)}{\sum_{n=1}^m C_{ms-n}(s-1)} \quad /9/$$

В этой же главе получено аналитическое выражение для мощности МСМ при модуляции в неэквидистантных точках и расстоянии $T_c > T$ /сигналах МСМ/

$$G_z^2 = \frac{(1 - \frac{3\pi}{\Omega})^2}{\pi \lambda_0} \int_0^{3\pi - \Omega} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega - p2\pi}{2\lambda_0} \right)^2} d\omega +$$

$$+ \frac{1 - \frac{2\pi}{\Omega}}{\pi \lambda_0} \int_{3\pi - \Omega}^{\pi} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega - p2\pi}{2\lambda_0} \right)^2} d\omega \quad /10/$$

При МСМ, удовлетворяющих условию $\sum_{i=1}^d A_i X_i \equiv 0 \pmod{A_0}$, максимальная вероятность необнаруженной ошибки возникает, когда значение n -го перехода изменится на величину $\pm(d-1)$, а перехода $(n-1)$ го на ∓ 1 . Значения остальных координат вектора \bar{X} не должны изменяться:

$$P_{n0} = [P(0)]^{n-2} P(1) P(d-1) \quad /11/$$

($P(0)$ - вероятность правильного приема ЗММ, $P(1)$, $P(d-1)$ - вероятности изменения значения координаты на величины (± 1) и $\pm(d-1)$ соответственно.

Для случая нормального закона смещений ЗМВ

$$P(1) = \left[\Phi\left(\frac{1,5\Delta}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{0,5\Delta}{\sigma}\right) \right] \quad (12)$$

$$P(d-1) = \Phi\left[\frac{(d-0,5)\Delta}{\sigma}\right] - \Phi\left[\frac{(d-1,5)\Delta}{\sigma}\right] \quad (13)$$

$$P(0) = 2\Phi\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right) \quad (14)$$

Установлена взаимосвязь между величиной зоны Δ и σ при заданном качестве передачи (K_c)

$$\Delta \geq 2,8\sigma \sqrt{\ln i + 2,3(K_c - 1)} \quad (15)$$

Показано, что избыточные многопозиционные временные коды вызывают ошибки кратности i величиной $|e_0|$, если коэффициенты сравнения A_k определены согласно выражениям

$$A_k = (2e_0 + 1)^{k-1} \quad (16)$$

$$A_0 = \frac{1}{2} \left[(2e_0 + 1)^i + 1 \right] \quad (17)$$

В качестве примера в табл. I представлены значения коэффициентов A_i сравнения, при различной кратности ошибок $e_0 = \pm 1$, $e_0 = \pm 2$ и $e_0 = \pm 3$.

Таблица I

	A_k	A_i	A_j	A_0
$e_0 \pm 1$	1	3	9	14
$e_0 \pm 2$	1	5	25	63
$e_0 \pm 3$	1	7	49	172

В работе показано, что при МВС с защитой каждого ЗММ в сигнальной конструкции общее количество слов для случая трех ЗММ равно:

$$N_3 = N_2 \left(\frac{(m-3)S}{d_1} + 1 \right) + N_2 \left(\frac{(m-3)S}{d_1} \right) + \dots + 2 + 1 \quad (18)$$

где
$$N_2 = \left[\frac{(m-2)S}{d_1} + 1 \right]$$

Для случая МВК с четырьмя ЗММ:

$$\left. \begin{aligned} N_4 &= \sum_{p=0}^{r-1} N_3 (\gamma - p) \\ \gamma &= \left[\frac{(m-4)S}{d_1} + 1 \right] \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

В четвертой главе диссертации определена эффективность стартового протокола канального уровня для РЦК и МВК. В частности определены время передачи кадра с повторением, информационная и протокольная скорости.

Определена оптимальная величина зоны Δ для гауссового канала при условии, что вероятность необнаруженной ошибки не превышает избыточного разрядно-цифрового кода.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения вероятности правильного приема кадра и скорости передачи для сигналов МВС и РЦСК.

Т а б л и ц а 2

N_u	\bar{T}_n	$P_{вк}$	$R_{МВК}^{(УСД)}$	$R_3^{(УСД)}$	$V(\text{стр/сек})$	\bar{N}_z
45	1,06	0,93	0,61	1,47	37,97	55,12
30	1,11	0,94	0,71	1,32	34,00	41,07
15	1,10	0,95	0,60	1,13	28,00	24,50

В качестве синхронных рассмотрены протоколы HDLC и DDCMP для случая РЦСК и МВС. Определены вероятности верного приема кадра для гауссового канала и канала с коэффициентом группирования отлично от нуля. Показано, что при переходе к МВС группирования ошибок приводит к увеличению помехоустойчивости. Найдено оптимальное значение числа информационных байтов в кадре при постоянной величине зоны S и заданном h :

$$N_u = -3 + \sqrt{9 - \frac{N_0}{i \ln 2 \varphi(2h/\beta)}}$$

(N_0 - число байтов обрамляющих кадр).

Приведены алгоритмы формирования кадров и байтов при МВК и последовательность декодирования сигнальной конструкции на выходе канала.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы:

- I. Сформулирован критерий оценки систем связи и определены методы оптимизации их. Указано на взаимосвязи информационно-технических и конструктивно-эксплуатационных критериев.
2. Проанализированы методы повышения эффективности использования каналов связи.
3. Определены параметры помехи на выходе канала при сверхнаقصистой скорости модуляции.
4. Произведена оптимизация передаточной функции приемного фильтра, уменьшающая МСИ.
5. Произведен анализ применения алгоритма Витерби в канале со сверхнаقصистой скоростью модуляции.
6. Произведена оценка применения избыточных кодов при сверхнаقصистой скорости модуляции.
7. Анализ поэлементного приема в средней точке и приема в целом показывает, что в последнем случае при сверхнаقصистой модуляции можно существенно уменьшить вероятность ошибочного приема.
8. Получено аналитическое выражение мощности МСИ и МВС.
9. Найдено значение кодового расстояния через параметры помехи в канал и МВС. Оптимизирована величина значения зоны МВС.
10. Произведено сравнение избыточных МВС, обнаруживающих и исправляющих ошибки смещения.
- II. Сформулирован алгоритм защиты отдельных ЭМВ сигнальной конструкции и получено аналитическое выражение для мощности таких конструкций.
12. Произведено сравнение эффективности использования стартовых протоколов и протоколов канального уровня *HDLC*, *DSSMP*.

Публикации по теме диссертации:

1. Клес А.А., Нзисабра Нехеми. Нелинейная коррекция при сверхвысокоскоростной модуляции // Теория, системы и устройства связи: Сб. научных трудов ОЭИС. - Одесса, 1992.

2. Захарченко Н.В., Нзисабра Нехеми, Абу Джазар А.А. Сравнение простых и избыточных МВС с постоянным числом ЭММ // Теория системы и устройства связи: Сб. научных трудов ОЭИС. - Одесса, 1993.

Подписано к печати 12.07.1993 г. Объем 0,84 печ. л.
Формат 60x84¹/₁₆. Зак. 199. Тираж 100.

Типография Одесского электротехнического института связи
им. А.С.Попова. Одесса, Старопортофранковская, 61

466012

AB 27.800

AB 27.800