

## ПОВЕРХНОСТНО – УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ПРЕРЫВИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Драчев А. О., Палагнюк Г. Г., Тараненко Г. В., Тараненко В. А. (ТГУ, ДонГТУ, СевНТУ, ЛТУ, г. Тольятти, г. Ростов-на-Дону, г. Севастополь, г. Люблин, Россия, Украина, Польша)

*The method of automatic control of surface elastic deformation of interrupted surfaces is presented. This method is developed on base of well-known solutions. The functional scheme of automatic control system of surface elastic deformation is presented. Formation of control signals algorithm to adjusted electric drive of cross-feed motion of tool-indicator with lag time is shown and also the scheme of mounting the measuring conversion device is offered.*

### Введение

Упрочняющая обработка заготовок, имеющих прерывистые поверхности (шпоночные пазы, лыски и др.) затруднена тем, что инструмент – индентор склонен к поломке. Традиционные методы поверхностного пластического деформирования – ППД сводятся к обработке с ложной шпонкой, выполненной заподлицо с обрабатываемым диаметром и жестко закрепленной на заготовке. Этот способ обработки не производителен и сложный. Разработанный способ автоматического управления позволяет решить задачу повышения точности обработки и долговечности инструмента для упрочняющей обработки прерывистых поверхностей.

### Способ поверхностно – упрочняющей обработки прерывистых поверхностей

Сущность способа основана на особенностях формирования управляющего сигнала, меняющегося по сложному закону и обеспечивающего, воздействуя на привод, плавное регулирование положением рабочего инструмента, исключая циклическую импульсную нагруженность последнего, обеспечивая заданную глубину деформированного слоя и его качество формообразования при обработке прерывистых поверхностей.

На рис. 1 приведена упрощенная функциональная схема устройства для реализации способа автоматического управления процессом ППД прерывистых поверхностей [1].

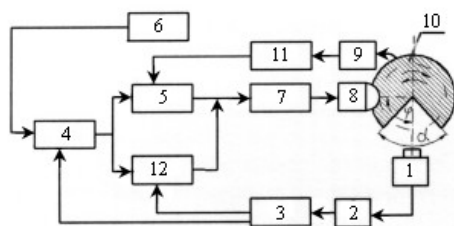


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема устройства для реализации способа автоматического управления процессом ППД прерывистых поверхностей

Глубину деформированного слоя задают задатчиком 6 в виде аналогового напряжения, воздействующего через блок 5 и ключи 4 и 12 на электропривод 7, управляющий положением инструмента 8.

Учитывая обработку прерывистых поверхностей, сигнал управления, изменяющийся во времени по сложному закону, формируют в функции непрерывного пути, пройденного инструментом. Для этого измеряют длину впадины прерывистых поверхностей с помощью бесконтактного преобразователя 1 (например, токовихревого)

и формируют сигнал в виде прямоугольных импульсов с помощью блока 2, длительность которых пропорциональна длине впадины прерывной части поверхности, а длина непрерывной части пропорциональна паузе между импульсами. Благодаря значительному быстродействию регулируемого электропривода и опережающей позиции измерения на угол  $\varphi$  по отношению к позиции обработки представляется возможным с учетом вращения заготовки, а также переходных процессов, формировать напряжение автоматической корректировки управляющего сигнала, определяющего плавную скорость приращения и заданную глубину деформированного слоя, начиная с момента касания инструмента.

Так как позиция измерения опережает позицию обработки на угол  $\varphi$ , то сформированный сигнал в виде прямоугольного импульса автоматически задерживают во времени с помощью блока 3 задержки на величину  $\tau_{зad.} = 30\varphi / \pi \cdot n$ , где  $n$  - число оборотов заготовки.

По истечению времени задержки ( $\tau_{зad.}$ ) выводят инструмент из зоны обработки путем воздействия прямоугольного импульса на электронные ключи 4 и 12. При этом электронный ключ 4 закрывается, электронный ключ 12 открывается, что приводит к прекращению подачи управляющего сигнала с выхода задатчика 6 глубины деформированного слоя на вход электропривода 7 через электронный ключ 4 и интегратор 5. Открыванием электронного ключа 12 осуществляется быстрый разряд емкости интегратора 5 и его подготовки к следующему циклу управления на следующий оборот заготовки.

По истечению длительности прямоугольного импульса, когда начало непрерывной поверхности, подается в зону обработки, ключ 4 открывается, электронный ключ 12 закрывается. Указанным состоянием электронных ключей обеспечивают скачком подачу заданного управляющего напряжения с выхода задатчика 6, соответствующего заданной глубине деформированного слоя, через интегратор 5 на вход электропривода 7 поперечной подачи инструмента 8 на заготовку 10.

Врезание инструмента 8 по экспоненциальному закону с момента касания инструмента 8 и заготовки 10 осуществляется путем интегрирования интегратором 5 дискретного приращения заданного сигнала, подаваемого на выход интегратора 5 через электронный ключ 4. При этом постоянную времени интегрирования задают, автоматически, корректируя в функции изменения частоты вращения заготовки с помощью цепи, образованной преобразователем 9 регистрации частоты вращения заготовки 10 и блоком 11 формирования управляющего напряжения, изменяющего постоянную времени  $RC$  – цепи интегратора 5, путем изменения величины резистора  $R$ , в качестве которого, например, используют сток – истоковый переход полевого транзистора.

Изменение сопротивления резистора  $R$  приводит к изменению скорости приращения кривой, выходящей на экспоненту. Уровень максимального сигнала по истечении времени интегрирования устанавливается равным напряжению, установленному задатчиком 6, соответствующему заданной глубине деформированного слоя (рис. 2, где  $U_1$  – сигнал на выходе ключа 4;  $U_2$  – сигнал на выходе блока 5;  $U_{зad.}$  – заданный сигнал;  $t_1$  – время нарастания сигнала до заданного уровня). Такой уровень сигнала поддерживается на входе регулируемого привода 7 до тех пор, пока в зоне обработки находится непрерывная часть поверхности заготовки, то есть поддерживается в течении времени  $t = 30(2\pi - \alpha) / \pi \cdot n$ , где  $\alpha$  - центральный угол, охватывающий длину дуги впадины.

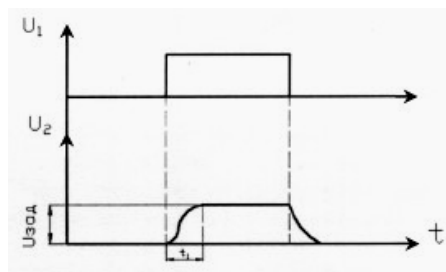


Рис. 2. График переходного процесса обработки прерывистой поверхности

По истечении времени  $t$  на выходе блока 3 появляется прямоугольный импульс, переключающий состояние (положение) электронных ключей 4 и 12, и процесс управления поперечной подачей рабочего инструмента 8 по описанному закону повторяется за каждый оборот заготовки 10.

### **Система автоматического управления ППД прерывистых поверхностей**

Разработанная система автоматического управления (САУ) позволяет повысить точность обработки и поддерживать оптимальные режимы обработки ППД прерывистых поверхностей. Функциональная схема системы автоматического управления ППД прерывистых поверхностей тел вращения представлена на рис. 3, а установка первичных преобразователей, расположенных на суппорте станка представлена на рис.4 [2].

Система автоматического управления работает следующим образом.

Задание требуемой глубины деформированного слоя задатчиком 1 и отработка этой величины в направлении поперечной подачи инструмента 6 (рис.3) при постоянных усилиях деформирования детали 7 осуществляется в САУ аналогично, как это описано в способе (рис.1) ППД при помощи управляемого привода 5.

Однако особенность обработки прерывистых поверхностей требует соответственно прерывистого управления приводом поперечных подач, а следовательно, в разработке соответствующего алгоритма управления и средств его обеспечения, которые должны обеспечивать своевременный отвод рабочего инструмента 6 из зоны обработки при наступлении начала длины впадины прерывистой поверхности детали 7, а также своевременный подвод инструмента 6 и обеспечение плавного контакта инструмент – деталь, в момент поступления в зону обработки грани (начала) непрерывной части поверхности обрабатываемой детали 7 с последующим внедрением инструмента 6 по заданной экспоненте на заданную глубину деформируемого слоя, заданной задатчиком 1. То есть возникает необходимость в формировании сложной формы управляющего сигнала приводом 5 поперечной подачи рабочего инструмента 6 на деталь 7 в функции пути, пройденного инструментом по периметру обработки.

Формирование управляющего сигнала сложной формы в САУ осуществляется при помощи измерения каналами А и Б длины впадины, включающих элементы 8 – 16, а также при помощи остальных вспомогательных элементов 2 – 4 и 17 – 34.

Регистрация непрерывной части поверхности и длины впадин осуществляется преобразователями 8 и 9, измерительных каналов А и Б, и установленных по осям координат  $Y$  и  $Z$  в плоскости обработки таким образом, что позиция измерения опережает позицию (зону) обработки на некоторый угол (на рис.3 в качестве примера угла  $\varphi = 90^\circ$  между осью инструмента 6 и осью преобразователя 8 позиции измерения). В качестве бесконтактных преобразователей 8 и 9 регистрации впадин могут быть использованы специальные токовихревые датчики, выпускаемые промышленностью.

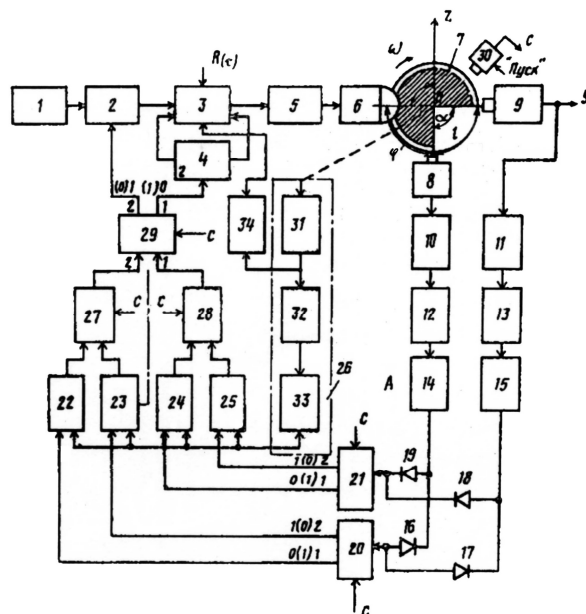


Рис. 3. Функциональная схема САУ ППД прерывистых поверхностей тел вращения

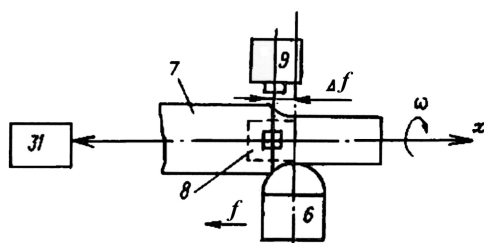


Рис. 4. Установка преобразователей на суппорте станка

Сущность формирования управляющего сигнала поясняется диаграммой и формой напряжений на выходах основных блоков САУ, которые показаны на рис.5

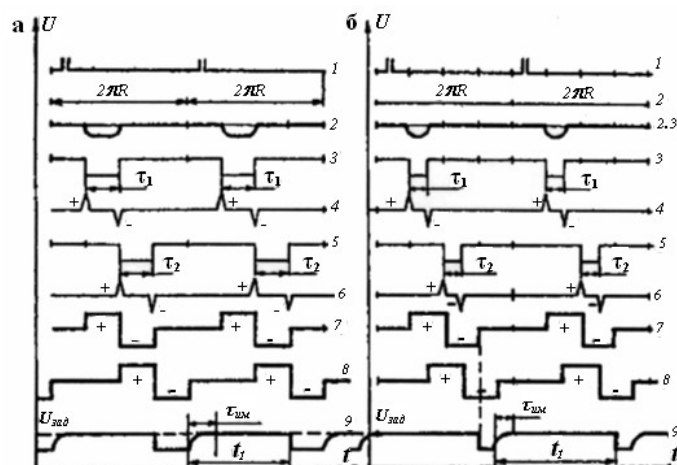


Рис. 5. Диаграммы напряжений формирования управляющего сигнала с задержкой во времени по отношению к позициям измерения длины впадины: кривые, соответствующие регистрации длины впадины, равной 1/4 длины окружности – а), кривые, соответствующие регистрации длины впадины, равной 1/8 длины окружности – б)

Сигнал с выхода преобразователей 8 и 9 (рис.5, кривая 2) колоколообразной формы подается в каждый канал на блоки 10 и 11 формирования прямоугольных импульсов (кривая 3 – блока 11, а кривая 5 – блока 10) длительностью, равной длине впадины прерывистой поверхности, которая может быть определена из выражения:

$$\tau_{ин.} = \frac{30\alpha}{\pi \cdot n},$$

где  $\alpha$  - центральный угол, определяющий длину дуги впадины,  $n$  – число оборотов детали.

Затем этот сигнал дифференцируется звеном 13 канала Б (кривая 4) и звеном 12 (кривая 6) канала А и подается на входы нормализаторов 14 и 15 коротких импульсов по длительности и форме, сохраняя положительную и отрицательную полярность согласно продифференцированному сигналу (кривые 4, 6 рис.5). Причем положительные импульсы дифференцированного сигнала указанных кривых соответствуют началу длины впадины, проходящей позицию измерения преобразователями 8 и 9, а отрицательные – концу длины впадины, проходящей позиции измерения каналов А и Б. Частота следования прямоугольных импульсов, а следовательно импульсов одного знака продифференцированного сигнала определяется частотой вращения детали 7 и количеством впадин на длине окружности обрабатываемой поверхности и определяется из выражения:

$$f_{имп.} = \frac{n \cdot Z}{60},$$

где  $Z$  – количество впадин.

Так как (позиция) процесс измерения длины впадины, а следовательно, и формирование управляющего сигнала в виде прямоугольных импульсов, длительностью пропорциональной длине впадины, осуществляется с опережением по отношению к позиции обработки, то для автоматического управления положением инструмента 6 сформированный сигнал в виде прямоугольного импульса необходимо задерживать во времени на величину, равную опережению измерения длины впадины. Однако время опережения измерения, а следовательно, и время задержки прямоугольного импульса не остаются постоянными, а изменяются с изменением частоты вращения (оборотов обрабатываемой детали) и определяются как отношение длины окружности, заключенной между вершиной инструмента 6 и измерительным элементом преобразователя регистрации впадин, к скорости относительного скольжения. Длина дуги  $l = \pi \cdot R/2$ ,  $v = \omega \cdot R = \pi \cdot n \cdot R/30$ , тогда  $t = \pi \cdot R/2$ ,  $\pi \cdot n \cdot R/30 = 15/n$ , для случая, когда  $\varphi = 90^\circ$  в общем виде  $t = 30\varphi/\pi \cdot n$ , где  $\varphi$  - может быть произвольный угол. Чем меньше угол  $\varphi$  установки преобразователя 8 по отношению к инструменту 6, тем меньше время задержки. Учитывая указанную зависимость времени задержки от оборотов детали, а также обстоятельство, что задавать и поддерживать время задержки вручную практически невозможно, в САУ предусмотрено, два контура формирования и корректировки прямоугольных импульсов управления, обеспечивающих автоматическое слежение и корректировку при изменении частоты вращения детали. Для этого в САУ используется два идентичных канала А и Б измерения длины дуги впадины, производящие измерения одного и того же параметра в разные промежутки времени

(смещенные во времени), а также вспомогательные элементы 16 – 34, формирующие с необходимой задержкой во времени прямоугольные импульсы управления (длительностью, пропорциональной (равной) длине впадины контролируемой детали), управляющие контуром регулируемого электропривода поперечных подач инструмента, включающих последовательно соединенные задатчик 1, управляемые электронные ключи 2 и 4, интегратор 3, привод 5 и инструмент 6. Пример формирования управляющих прямоугольных импульсов длительностью, пропорциональной длине впадин, с автоматической задержкой во времени, также поясняется рис. 5 и осуществляется следующим образом.

В момент включения САУ при задании необходимых технологических параметров режимов обработки на сбросовые входы (с) реверсивных счетчиков 27 и 28 и управляемых триггеров 20, 21 и 29 подается запирающее напряжение, переводящее САУ в исходное состояние.

В исходном состоянии электронные ключи 2, 22, 23, 24 и 25 закрыты, а электронный ключ 4 открыт и обнуляет значение напряжения на выходе интегратора 7. При этом реверсивные счетчики 27 и 28 также находятся в «нулевом» состоянии, а закрытие электронного ключа 2 исключает случайную подачу управляющего напряжения на вход регулируемого привода 5 через интегратор 3. Напряжение запирающего, подаваемого на управляющие сбросовые входы элементов 20, 21, 27, 28 и 29, а также формирование короткого синхронизирующего импульса (метки), устанавливающего очередность управления триггерами 20 и 21, выходными сигналами каналов А и Б определяется синхронизирующим преобразователем 30 и встроенным в него блоком формирования запирающего напряжения и одиночного синхронизирующего импульса при нажатии кнопки «Пуск».

Кнопки «Пуск», «Стоп», а также связь управляющих сбросовых входов элементов 20, 21, 27, 28 и 29 с выходом преобразователя 30 для упрощения схемы на рис.3 не показаны. Связь запрещающих входов счетчиков 27 и 28 показана штриховой линией, так как может отсутствовать в зависимости от конструктивных особенностей счетчиков 27 и 28, например, счетчиков, прекращающих автоматически операцию вычитания при их обнулении.

Формирование одиночного синхронизирующего импульса преобразователем 30 осуществляется при нажатии оператором кнопки «Пуск», которая снимает запирающее напряжение из сбросовых входов элементов 20, 21, 27, 28 и 29 и устанавливает первоочередность формирования прямоугольных импульсов измерительными каналами А и Б в зависимости от направления вращения обрабатываемой детали. В указанном на рис.3 направлении (по часовой стрелке) первым производит измерение длины впадины канал Б, а затем – канал А.

Таким образом, приходящий первый короткий по длительности положительный импульс с выхода блока 15 канала Б (соответствующий началу впадины на позиции измерения каналом Б) через полупроводниковый диод 18 подается на счетный вход триггера 21 и переводит его в единичное состояние. Напряжение логической единицы с выхода (1) триггера 21 открывает электронный ключ 24, который разрешает подачу тактовых импульсов с выхода генератора 26 на суммирующий (+) вход реверсивного счетчика 28.

Реверсивный счетчик 28 выполняет операцию сложения тактовых импульсов в двоично-десятичном коде до тех пор, пока (рис.5 – временные диаграммы напряжений, кривые 2, 6, 7) на счетный вход триггера 21 не поступает следующий положительный короткий по длительности импульс, но с выхода канала А через диод 19, включенный в

прямом направлении и соответствующий регистрации (измерению) начала впадины на другой позиции преобразователем 8 канала А (кривые 5 и 6).

При поступлении второго положительного импульса на счетный вход триггера 21 последний переходит в новое устойчивое нулевое положение, при котором на его выходе (2) появляется напряжение управления «логической единицы», переводящее режим работы счетчика 28 из режима сложения (+) на режим вычитания (-). При этом электронный ключ 24 закрывается, а электронный ключ 25 открывается и разрешает подачу тактовых импульсов с выхода генератора 26 тактовых импульсов и усилителя-формирователя 33 на вычитающий (-) вход счетчика 28.

Процесс вычитания длится до тех пор, пока разряды двоично-десятичного счетчика не обнулятся, то есть время проведения операции сложения в точности равно времени операции вычитания ранее считанного при сложении определенного числа импульсов (кривая 7). Для наглядности операция сложения (+) и вычитания (-) на рис. 5 (кривая 7) показаны в виде разнознаковых прямоугольных импульсов положительной и отрицательной полярности. При обнулении разрядов реверсивного счетчика 28 на его выходе появляется постоянное управляющее напряжение, которое, воздействуя на первый (1) динамический вход триггера 29, подчеркивает его исходное (открытое) состояние, так как высший потенциал на выходе (1) открывает электронный ключ 4, а низкий – на выходе (2) триггера 29 закрывает электронный ключ 2. В свою очередь, отрицательные по знаку и короткие по длительности прямоугольные импульсы с выходов каналов А и Б, соответствующие концу регистрации длины впадины преобразователем 9 – (кривые 3 и 4), - а затем с задержкой во времени преобразователем 8 – (кривые 5 и 6 – канал А) через полупроводниковые диоды 16 и 17, включенных встречно по отношению к направлению выходов каналов поступают на счетный вход триггера 20, который аналогично триггеру 21 управляет электронными ключами 22 и 23, разрешающими подачу тактовых импульсов с выхода усилителя-формирователя 33 генератора 26 на вход сложения (+), а затем вычитания (-) второго реверсивного счетчика 27. Последний аналогично счетчику 28 после проведения операции сложения, подаваемых на вход тактовых импульсов с последующим вычитанием (кривая 8 – рис.5) до обнуления, вырабатывает сигнал управления, который, воздействуя на второй динамический вход триггера 29, переводит его в новое устойчивое состояние, при котором сигнал на выходе (1) обнуляется, а на выходе (2) появляется напряжение, соответствующее уровню логической единицы. Указанное состояние триггера 29 закрывает электронный ключ 4 и открывает электронный ключ 2, разрешая, тем самым, подачу выходного напряжения с задатчика 1 через интегратор 3 на вход регулируемого привода 5 поперечной подачи инструмента 6 на деталь 7. Затем цикл формирования сигнала повторяется аналогично описанному выше.

Так как постоянное напряжение задатчика 1 ( $U_{зад.}$ ), соответствующее заданной глубине деформированного слоя, подается через управляемый электронный ключ 2, прямоугольными импульсами длительностью, соответствующей длине впадин, то на выходе ключа 2 появляются прямоугольные импульсы, соответствующие длине дуги непрерывной части поверхности обрабатываемой детали, длительностью  $t$ , равной:

$$t = \frac{30(2\pi - \alpha)}{\alpha \cdot n}.$$

Для обеспечения плавного врезания на заданную глубину деформируемого слоя и быстрого отвода инструмента 6 в момент прохождения впадины между электронным ключом 2 и управляемым приводом 5 включен интегратор 3 с регулируемым временем

интегрирования, управляемый электронный ключ 4, подключенный параллельно емкости интегратора и обеспечивающий ее разряд в момент прохождения впадины. Обеспечение плавного врезания осуществляется путем интегрирования управляющих прямоугольных импульсов длительностью  $t$ , приобретает вид кривой 9 (рис.5), переходящей в асимптоту, и обеспечивают врезание инструмента 6 в деталь 7 с заданной скоростью по экспоненте.

Изменение скорости нарастания осуществляется в САУ путем изменения заданной постоянной времени интегрирования интегратора 3. Для автоматической корректировки постоянной времени интегрирования, в функции изменения частоты вращения детали, сигнал с выхода преобразователя 31 регистрации частоты вращения детали детектируется, усредняется блоком 34 и подается на управляющий вход интегратора 3, изменяя, например, активное сопротивление  $RC$  – цепи, воздействуя через затвор на сток – истоковый переход полевого транзистора, выполняющего функции активного сопротивления. Приращение частоты вращения детали приводит к увеличению напряжения на выходе блока 34, которое уменьшает активное сопротивление  $RC$  – цепи, а следовательно, уменьшает время заряда емкости по кривой (экспоненте), переходящей в асимптоту, уровень которой соответствует заданной глубине деформированного слоя. Форма управляющего сигнала на входе управляемого привода 5 имеет вид кривой 9 (рис.5) и может корректироваться также вручную, меняя значение  $RC$  – цепи интегратора. Высокую частоту следования тактовых импульсов генератора 26 получают путем умножения частоты вращения детали, регистрируемой преобразователем 31. Умножение частоты вращения на коэффициент  $m$  осуществляется блоком 32 и через усилитель-формирователь 33 подается на сигнальные входы электронных ключей. Чем выше частота следования импульсов, тем точнее измерение и управление.

### **Заключение**

Теоретически обоснован способ автоматического управления поверхностным пластическим деформированием прерывистых поверхностей на деталях типа тела вращения. Разработана функциональная схема системы автоматического управления ППД и алгоритм работы САУ, который достаточно подробно описан с иллюстрацией формирования управляющих сигналов на диаграмме напряжений с учетом времени запаздывания и измерения начала впадин. Разработаны условия обеспечения плавного врезания на заданную глубину деформируемого слоя и быстрого отвода инструмента в момент прохождения впадины за счет введения в схему САУ интегратора с возможностью изменения заданной постоянной времени интегрирования.

**Список литературы:** 1. Авторское свидетельство SU № 12207730 А Способ управления процессом обработки прерывистых поверхностей, БИ № 12, 1986. 2. Авторское свидетельство SU № 1207303 А Устройство для автоматического управления процессом обработки прерывистых поверхностей, БИ № 12, 1984.

Сдано в редакцию 21.01.2009