

2. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Николис Г., Пригожин И. – М. : Мир, 1979. – 512 с.
3. Журавлёв В. Н. Синергетическая концепция энергоинформационного обмена речеслуховой системы / В. Н. Журавлёв // Адаптивные системы автоматического управления. – 2007. – № 11. – С. 128–135.
4. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем / Климонтович Ю. Л. – М. : Янус, 1995. – 624 с.
5. Климонтович Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса / Климонтович Ю. Л. – М. : Ком. книга, 2007. – 328 с.
6. Анохин П. К. Кибернетика функциональных систем / Анохин П. К. – М. : Медицина, 1998. – 400 с.
7. Шеннон К. Современные достижения теории связи. / К. Шеннон // Работы по теории информации и кибернетике. – М. : Издательство иностранной литературы, 1963. – С. 403–414.
8. Цвикер Э. Ухо как приемник информации. / Цвикер Э., Фельдкеллер Р. ; пер. с нем. под ред. Б. Г. Белкина. – М. : Связь, 1971. – 225 с.

Надійшла 16.02.2009

Після доробки 27.04.2009

Розглянута задача, суттю якої є розкриття та аналіз імпульсного процесу психофізіологічного інформаційного керування мовним та слуховим процесами. Розроблено метод аналізу зв'язку керуючих параметрів центральної нервової системи з фізіологічними органами мови та механізмом зняття ентропії з ламінарного потоку повітря у процесі синтезу сигналів мови.

The task, the main point of which is the expansion and analysis of impulse character of speech-hearing process psycho-physiological informational control is under review. The method of analysis of connection between the control parameters of central nervous system under speech executive organs and the mechanism of taking down of entropy from the laminar air flow in the process of speech signal synthesis was developed.

УДК 004.032.26

Т. В. Кіпріч, В. М. Харитонов, В. І. Дубровін, А. В. Притула

ПОБУДОВА МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПОМПАЖНИХ ЯВИЩ У ГАЗОТУРБІННОМУ ДВИГУНІ

Метою існуючих систем захисту газотурбінного двигуна від зривних процесів є автоматичне відновлення режиму роботи двигуна після усунення помпажу, а не запобігання виникненню газодинамічної нестійкості у турбомашинах. Запропонована модель модуля попередження помпажу ґрунтується на основі вейвлет-аналізу та карт Кохонена SOM. Приводиться порівняльний аналіз результатів виявлення зривних процесів за допомогою даного підходу та спрощених моделей.

ВСТУП

Існує два види зривних режимів, що призводять до аварійного стану газотурбінного двигуна (ГТД) та характеризуються значними коливаннями: обертовий зрив та явища типу помпажних. Обертовий зрив у більшості випадків пов'язаний із зривом потоку з лопаток компенсатора та розповсюдженням збурення по колу проточної частини компресора. Внаслідок цього явища може бути розвиненим помпаж ГТД, який супроводжується коливанням тиску, швидкостей та витрат газу по тракту двигуна; зменшенням частот обертання роторів; зростанням температури газів перед і за турбіною чи загасанням камери згорання [1].

Серед наведених параметрів найбільш характерним для помпажних явищ є різке падіння тиску повітря за компресором ($P_{\text{квт}}$) чи по тракту двигуна, що повторюється при кожному імпульсі помпажних коливань. Тому робота більшості сигналізаторів побудова-

на саме на обробці сигналу $P_{\text{квт}}$, за допомогою якого при помпажі здійснюється виробка відповідного сигналу до протипомпажного та протизривного блоку (ППБ) (або системи захисту від помпажу за обертового зриву) для впливу на виконавчий орган системи автоматичного керування двигуном (САКД). Однак, метою сучасних САКД є відновлення режиму роботи двигуна після помпажу, а не попередження розвитку газодинамічної нестійкості у турбомашинах. Тому необхідна відповідна розробка нових та модифікація існуючих методів для попередження виникнення зривних процесів у турбокомпресорі та реалізація модуля попередження помпажу (МПП) у САКД.

1 ОГЛЯД ПОПЕРЕДЕНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасних САКД реалізовано наступні сигналізатори коливань із логарифмічними датчиками [1]:

- 1) штатний датчик логарифмічний типу ДОЛ із електронним перетворювачем ЕП-В;
- 2) сигналізатори помпажу ПС та ПС-2-7.

Датчик тиску ДОЛ призначений для виміру надлишкового тиску повітря із видачею сигналу змінного току пропорційного логарифму вимірювального тиску на електронний перетворювач ЕП-В [2, 3]. При втраті стійкості компресора ЕП-В замикає ланцюг керування ППБ САКД. Принцип роботи перетворювача побудований на виділенні сигналу із зада-

© Кіпріч Т. В., Харитонов В. М., Дубровін В. І., 2009

ною відносною швидкістю зміни його значення. При перевищенні деякої граничної величини (що настроюється) спрацьовує амплітудний сектор і на виході перетворювача з'являється командний сигнал:

1) ЕП–В видає до ППБ сигнал помпажу, коли відносне падіння тиску повітря за компресором $\frac{\Delta P_2}{P_2} \geq 0,55$ та відносна швидкість падіння $\frac{\Delta P_2}{\Delta t P_2} \geq 7$ (де P_2 – зміна тиску повітря за компресором за час t).

Частота коливань повітря при цьому сягає 5–15 Гц, час запізнення сигналу не більш ніж 0,05 с, а тривалість не більш ніж 0,02 с;

2) ЕП–В видає до ППБ сигнал обертового зриву, коли виконуються умова: $\frac{\Delta P_2}{P_2} \geq 0,35$.

На відміну від ДОЛ із ЕП–В для сигналізаторів помпажу ПС/ПС–2–7, помпаж визначається як різке падіння тиску повітря за компресором на величину не менш ніж $0,4P_2$ для ПС і $0,6P_2$ для ПС–2–7 [4].

Не дивлячись на переваги використання наведених сигналізаторів помпажу із логарифмічною характеристикою, висока швидкість розвитку помпажних явищ приводить до того, що сигнал про початок зривних процесів не може бути реалізованим у САКД настільки швидко, щоб попередити помпаж.

Одним із підходів до ранньої діагностики розвитку зривних процесів стає використання методу вейвлет-аналізу (ВА) для обробки часових та амплітудних характеристик сигналів вимірювальних систем, що визначають стійкість роботи двигуна. Отримані результати [5] свідчать про те, що на певних масштабах статистичні моменти (m_2 – m_4) розподілення вейвлет-коефіцієнтів (ВК) сигналів від датчиків тиску повітря, які розташовані в компресорі, можуть помітно змінюватися при виникненні та розвитку помпажної ситуації. Однак даний підхід має наступні недоліки:

– m_2 – m_4 відносяться до діагностичних ознак, які пов'язані із абсолютним значенням характеристик вимірювального параметру. У роботі [6] запропоновано метод на основі ВА та S-дискримінанту (I_d), що забезпечує інваріантність отриманих оцінок та діагностування помпажних явищ;

– вибір вейвлета та рівень розкладання було обра-
но емпіричним шляхом;

– аналіз зривних процесів виконувався тільки на основі P_2 .

Тому необхідно розробити відповідну модифікацію даного методу для його ефективного застосування у ППБ САКД.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

При побудові модуля попередження помпажу, необхідно виконати наступне:

– обрати тип вейвлета й параметри вейвлет-перетворення;

– побудувати модель газодинамічного стану двигуна, вхідними параметрами якої є дискримінантні оцінки поведінки ВК для набору сигналів вимірювальних систем, що визначають усталену роботу компресора, а вихідними – ознака виявлення помпажу й/або обертового зриву;

– визначити компоненти регулювання МПП при виникненні та й розвитку зривних процесів у ГТД.

3 ВИБІР ВЕЙВЛЕТУ ТА ЙОГО ПАРАМЕТРІВ

Визначення діапазону можливих частот коливань необхідно, насамперед, для розробки й налаштування засобів захисту двигунів під час помпажу та обертового зриву. Тому виникає задача вибору найбільш ефективного вейвлета, що володіє високою швидкодією й вибірковістю за частотою для пояснення фізики досліджуваного процесу.

Через здатність до швидкого алгоритму Маала у роботі були досліджені вейвети Добеші (db1–db44), Симлету (sym1–sym10), Койфлету (coif1–coif5) а також дискретний вейвлет Мейера.

Аналіз фільтруючих властивостей даних вейвлетів свідчить про те, що порядок вейвлета (N) є еквівалентом характеристики зрізу смуги пропускання. Із збільшенням N крутість зрізу АЧХ вейвлетів збільшується і відповідно покращується якість реконструкції сигналів. Частотна характеристика вейвлетів Добеші у зрівнянні із вейветами Койфлету того ж порядку має більш низьку крутість зрізу смуги пропускання та збігається із Фур'є-образом Симлету. Дискретний вейвлет Мейера має найкращу характеристику зрізу смуги пропускання у порівнянні із db20 та coif5.

Крім того, для наочного трактування фізичної картини виникнення помпажу у турбокомпресорі ГТД до коефіцієнтів апроксимації та деталізації ВП було застосовано швидке перетворення Фур'є. У результаті частотне представлення ВК сигналу $P_{\text{квт}}$ вейвлетів першого та другого порядків (особливо db2/sym2) на 7-му рівні дозволяє демонструвати зростання потужностей у частотних областях, що є характерними для помпажу та обертового зриву. Поступове збільшення порядку вейвлетів дає можливість спостерігати лише обертовий зрив коло частоти 100 Гц. Приведена особливість пояснюється шириною смуги пропускання Фур'є-образів вейвлетів на 7-му рівні.

Отримані результати дозволяють провести подальший аналіз зривних процесів за допомогою вейвлетів

із низьким порядком. Враховуючи високу швидкість та особливості опису виникнення помпажних явищ за допомогою швидкого перетворення Фур'є ВК сигналу $P_{\text{квт}}$ для діагностування помпажу був обраний вейвлет db2. При цьому відслідковувати поведження ВК необхідно на 7-му рівні розкладання.

4 ПОБУДОВА МОДУЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПОМПАЖУ

Для аналізу поточної газо-динамічної нестійкості (ГДН) двигуна та збільшення ефективності виявлення провісників помпажних явищ був обраний метод штучних нейронних мереж карт Кохонена (Self-organizing map, SOM). При виборі даного методу, насамперед, враховувалося те, що обертовий зрив не завжди переходить у помпаж і сформувавши правило такого переходу не можна. Принципи навчання SOM дозволяють аналізувати ті стани систем і процесів,

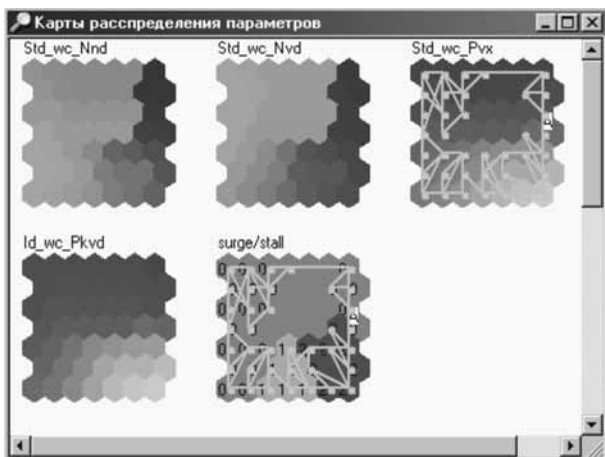


Рисунок 1 – Діагностування помпажу за допомогою слідкування за траєкторією робочої точки процесу ГДН

які важко визначити або інтерпретувати стандартними засобами математичної статистики [7].

При побудові моделі ГДН вихідними параметрами SOM були індекс перевищення порогу кліпування по дисперсії I_d для ВК сигналу $P_{\text{квт}}$ та стандартне відхилення у (std) наступних сигналів:

- 1) частота обертання роторів низького тиску $n_{\text{вд}}$;
- 2) частота обертання роторів високого тиску $n_{\text{нд}}$.

З метою підвищення швидкодії МПП для сигналів $P_{\text{вх}}$, $n_{\text{вд}}$, $n_{\text{нд}}$ як оцінний параметр був прийнятий параметр у (std).

На виході моделі знімається інформація про газо-динамічний стан двигуна: 0 – нормальний режим роботи; 2 – обертовий зрив, 1 – помпаж.

У результаті навчання на SOM формуються зони, що відповідають перехідним процесам «нормальний режим роботи – обертовий зрив – помпаж».

На основі траєкторії руху робочої точки на SOM, можна визначити виникнення небезпечної ситуації типу помпаж при наблизенні даної точки до границі області обертового зриву (рис. 1).

Виходячи з виконаних розробок, модель МПП, можна представити в такий спосіб (рис. 2). На вхід модуля виявлення помпажу надходять сигнали від датчиків вимірювальних систем двигуна: $P_{\text{квт}}$, $P_{\text{вх}}$, $n_{\text{вд}}$, $n_{\text{нд}}$. На основі вейвлет-розкладання наведених сигналів ('db2', рівні розкладання 7, 10) і аналізу S-дискримінант ВК по $P_{\text{квт}}$ на SOM формуються вихідні дані про виявлення помпажних явищ. За допомогою SOM відбувається вироблення сигналу про газо-динамічний стан двигуна (0/1/2) на блок прийняття рішення. У даному блоці, виходячи з аналізу сигналів вимірювальних систем двигуна та сигналу – результату від SOM, формується керуючий вплив на блок протипомпажного регулювання, що включає антипомпажний клапан, насос-регулятор, α -регулювання вхідного напрямного апарату. За рахунок раннього виявлення розвитку зривних процесів МПП не дозволяє розвиватися небезпечним явищам типу помпаж.

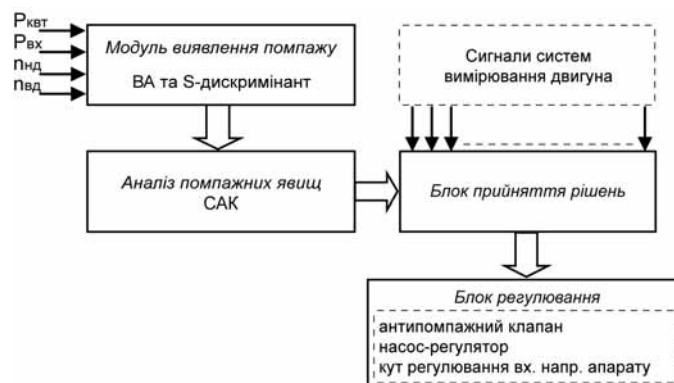


Рисунок 2 – Модуль попередження помпажу

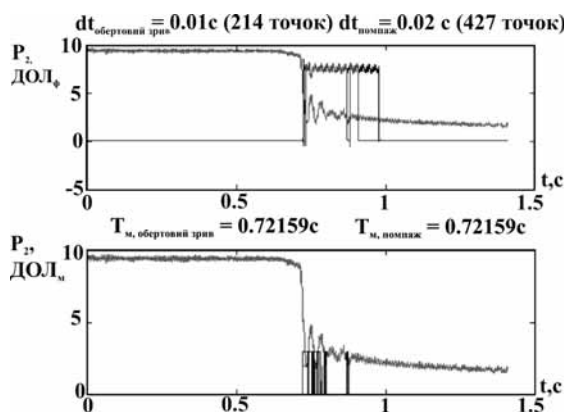


Рисунок 3 – Визначення зривних процесів за допомогою ДОЛ-32_м:

червона лінія – визначення помпажу, чорна – обертового зриву; $dt_{\text{обертовий зрив}}$, $dt_{\text{помпаж}}$ – часові вікна для аналізу обертового зриву та помпажу відповідно; $T_{m, \text{обертовий зрив}}$, $T_{m, \text{помпаж}}$ – час визначення помпажу та обертового зриву за допомогою моделі

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У процесі дослідження було обрано дані стендових іспитів ГТД ($P_{\text{квт}}$, $P_{\text{вх}}$, $n_{\text{вд}}$, $n_{\text{нд}}$) і сигнал, що надходив від ДОЛ_φ про наявність зривних процесів (рис. 3). Для навчання SOM, були обрані параметри I_d для ВК деталізації сигналу $P_{\text{квт}}$ та у для сигналів $P_{\text{вх}}$, $n_{\text{вд}}$, $n_{\text{нд}}$ (ширина тимчасового вікна 0,23 с, зсув 0,047 с).

Карта навчалась тільки на тих прикладах, для яких була характерно відсутність стану помпажу. На рис. 4 збільшення похибки апроксимації моделі (MSE) для даних по стендових випробуваннях ГТД відбувається на 205-му вимірі й поступово зростає. Зіставлення даних результатів з реальними значеннями показує, що з 210-го зразка у вибірці був присутній сигнал про виявлення помпажу.

Таблиця 1 – Результати виявлення помпажних явищ за допомогою сигналізаторів помпажу типу ДОЛ і методу на основі вейвлет-аналізу та SOM

№	Модель/метод	$T_{\text{ф}} - T_{\text{м}}$, мс	Ширина часового вікна, с
1	ДОЛ	10	0,02
2	ПС	10	
3	ПС-2-7	9,6	
4	ВА db8	16,5	0,23
5	SOM та ВА 'db2'	230	0,23

Порівняльний аналіз роботи спрощених моделей ДОЛ_м, ПС_м ПС-2-7_м та методу на основі ВА та SOM, реалізованих у середовищі С++, свідчить про те, що раніше за всіх розвиток помпажних явищ визначає

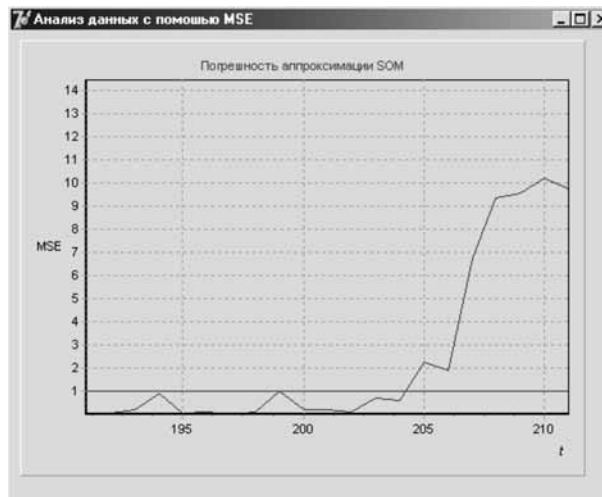


Рисунок 4 – Діагностування стану процесу ГДН за допомогою похибки навчання SOM

похибка навчання моделі ГДН – MSE (табл. 1), де $T_{\text{ф}}$, $T_{\text{м}}$ – фактичний та модельний час виявлення помпажних явищ за допомогою датчиків типу ДОЛ.

ВИСНОВКИ

Таким чином, з метою попередження розвитку зривних процесів у турбокомпресорі запропоновано модель модуля запобігання помпажу у САК ГТД. Робота даного модуля побудована на діагностуванні помпажних явищ за допомогою ВА (із попередньою обробкою даних S-дискримінантом) та карт Кохонена SOM. Порівняльний аналіз роботи спрощених моделей ДОЛ_м, ПС_м ПС-2-7_м та моделі газодинамічних процесів, що були отримані в результаті навчання SOM, свідчать про те, що раніше за всіх розвиток помпажних явищ визначає похибку навчання MSE.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Письменный И. Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе / Письменный И. Л. – М. : Машиностроение, 1987. – 128 с.
2. Руководство по технической эксплуатации ДОЛ РЭ (ДОЛ-16, ДОЛ-32, ДОЛ-32С), 1978. – 38 с.
3. Руководство по технической эксплуатации Преобразователя электронного ЭП-В, 1976/1979. – 45 с.
4. Руководство по технической эксплуатации ПС РЭ ПС-2-7, 1979. – 49 с.
5. Дремин И. М. Вейвлеты и их использование / Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, № 5. – С. 493-495.
6. Киприч Т. В. Контроль помпажных явлений ГТД на основе вейвлет-анализа и дискриминантных признаков / Киприч Т. В., Дубровин В. И. // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 1. – С. 166-169.
7. Саймон Хайкин. Нейронные сети : Полный курс : пер. с англ. / Саймон Хайкин. – 2-е издание. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.

Надійшла 24.06.2008

Целью существующих систем защиты газотурбинного двигателя от срывных процессов является автома-

тическое восстановление режима работы двигателя после устранения помпажа, а не предотвращение возникновения газодинамической неустойчивости в турбомашинах. Предложенная модель модуля предотвращения помпажа основана на методе вейвлет-анализа и картах Кохонена SOM. Приводится сравнительный анализ результатов обнаружения срывных процессов с помощью данного подхода и упрощенных моделей.

The aim of existing stall prevention systems in a gas-turbine engine is an automatic restoration of the engine operating conditions after a surge ceasing rather than prevention of a gas-dynamic instability in turbo machines. The model of a surge prevention modulus based on the method of wavelet-analysis and Kohonen's SOM maps is suggested. A comparative analysis for stall detection results is carried out with the help of such an approach and simplified models.

УДК 004.056:378 (147)

М. Г. Коляда

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛОВ СЕТЕЙ С ОЧЕРЕДЯМИ ПАКЕТОВ ЗАЩИЩЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье представлен механизм оптимизации каналов сетей с последовательными очередями пакетов защищенной информации на основе имитационного моделирования. Решение задачи представлено на основе вероятности и функция распределения прибывающих защищенных пакетов на один канал.

заявки. Образовывается очередь. Задача прогноза и состоит в том, чтобы установить с возможной точностью взаимную зависимость между числом обслуживающих единиц и качеством обслуживания. Под *качеством обслуживания* понимают количество заявок получающих отказ, либо среднее время ожидания, либо среднюю длину очереди.

ВВЕДЕНИЕ

Теория массового обслуживания предлагает несколько способов эффективного своего применения, и в первую очередь, избежание длинных очередей. Один из таких способов состоит в том, чтобы иметь только одну очередь, из которой клиенты поступают на обслуживание по принципу «первым пришел – первым обслужен». Эта система сейчас принята не только в теоретических расчетах радиотехнических и коммуникационных устройств, но и во многих ситуациях окружающей жизни: учреждениях и организациях, например, в банковских отделениях.

Имитационное моделирование (ИМ) предоставляет универсальные возможности для исследования информационных систем с учетом разнообразных свойств и взаимосвязей их элементов. Вопросам оптимизации, с использованием имитационного моделирования в системах обработки информации уделяли внимание многие авторы, например [1, 2]. Разработку проблемы оценки эффективности защиты информации, в линиях радиосвязи разрабатывали исследователи [3, 4].

В практической деятельности часто происходят ситуации, когда возникает массовый спрос на обслуживание какого-либо специального вида, причем, обслуживаемый объект, располагая лишь ограниченным числом обслуживающих единиц, не всегда способен немедленно удовлетворить все поступающие

Исследователи В. Н. Задорожный, Е. С. Ершов, О. Н. Канева, А. А. Донец разрабатывали оптимизацию сетей передачи информации с учетом образующихся очередей [5, 6]. Но научных работ, связанных с проблемой оптимизации передачи защищенной информации по каналам связи сети с учетом образующихся очередей в настоящее время практически нет. Многие авторы, в том числе и перечисленные, используют либо свои алгоритмы оптимизации сетей с очередями, либо готовые алгоритмы, заложенные в профессиональных системах имитационного моделирования (типа GPSS World). Поэтому, специалисты, которые занимаются практическим внедрением и эксплуатацией систем с многоканальной связью, сталкиваются с проблемами несоответствия результатов моделирования известным аналитическим зависимостям.

Появляются новые алгоритмы, совершенствуются средства взаимодействия пользователя с моделью, автоматизируются те этапы исследований, которые ранее были ручными, но все же имитационное исследование больше остается наукой и искусством, нежели инженерным средством для огромной армии системных аналитиков и инженеров. Имитация до сих пор остается уделом профессионалов «симуляционистов», и это сдерживает ее огромные потенциальные возможности использования в реальной практической жизни. Поэтому в работе была поставлена *цель* –

© Коляда М. Г., 2009