

ТЕХНОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.В. МАКСИМЕЙ, Д.Н. ШЕВЧЕНКО

Предложен подход и средства автоматизации дискретно-событийного имитационного моделирования параметрических отказов технических систем. Представлен пример создания модели и решения известной теоретической задачи анализа параметрического отказа механической системы. Показаны возможности имитационного моделирования более сложных практических задач.

ВВЕДЕНИЕ

Если функционирование объекта можно описать количественными параметрами, то отклонение значения хотя бы одного рабочего параметра объекта за пределы допуска называется параметрическим отказом [1, 2]. Параметрические отказы обуславливаются воздействием множества деградационных факторов, в основе которых лежит вероятностная природа (случайные нагрузки и условия эксплуатации, анизотропия материалов и т.д.). Поскольку качество функционирования объекта может определяться несколькими параметрами (величина износа, коэффициент трения, предел прочности и т.п.), то в общем случае параметрический отказ представляет собой многомерный случайный процесс с непрерывным временем и непрерывным фазовым пространством.

Цель работы — автоматизация имитационного моделирования параметрических отказов технических систем.

Для достижения поставленной цели в работе предлагается:

- подход формализации параметрических отказов;
- средства автоматизации имитационного моделирования;
- технология и пример их использования.

ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕГРАДАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

Деградационные факторы, определяющие процесс параметрического отказа и технических систем различаются по:

1. Типу фазового пространства:

- дискретные (например, условия применения элементов типа «вкл./выкл.»);

- непрерывные (действующие механические нагрузки).
- 2. Времени:
 - с непрерывным временем (например, износ режущего инструмента);
 - с дискретным временем (циклические, ударные нагрузки);
 - регулярные (плановые замены изношенных элементов).
- 3. Характеру изменения:
 - необратимые процессы, которые могут быть описаны монотонными функциями (например, износ или коррозия);
 - обратимые процессы (тепловая деформация);
 - периодические (изменения температуры окружающей среды).
- 4. Скорости изменения:
 - быстропротекающие процессы (например, вибрация, ударные нагрузки, внезапные отказы и процессы восстановления элементов — скачкообразное изменение значения параметра);
 - процессы средней скорости (износ режущего инструмента, рабочие нагрузки);
 - медленно протекающие процессы (износ, коррозия, ползучесть материалов).
- 5. Размерности (метры, Паскалы, количество оборотов в минуту и т.п.).
- 6. Динамическому размаху фазового пространства:
 - процессы с малым динамическим размахом (например, износ узлов подвижных сопряжений);
 - процессы с большим динамическим размахом (значения нагрузок, действующих на элементы силовой системы).

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОТКАЗА

Изучение процесса параметрического отказа аналитическими методами осложняется тем, что данный процесс не является стационарным; неудовлетворительно описывается известными теоретическими моделями (такими, как пуассоновские, диффузионные и т.д.); представляет собой многомерный случайный процесс, компоненты которого, зачастую, зависимы и обладают различными вероятностными свойствами.

Одна из первых аналитических моделей параметрического отказа была предложена еще в середине 20-го века [3]. С использованием ряда допущений и упрощений для данной модели были получены значения основных показателей надежности объектов [1, 2]. Другим известным подходом изучения параметрических отказов является вероятностное физическое моделирование [4], когда деградиционный процесс имитируется физическим процессом на электронном стенде с использованием генераторов случайных напряжений, преобразователей (делителей, усилителей), компараторов, счетчиков и других электронных элементов. Однако возможности такого подхода ограничены сложностью реализации произвольных моделей деградиционных процессов, а также сбора и анализа статистики.

В данной ситуации видится перспективным использование компьютерного имитационного моделирования, которое заключается в воспроизведении процесса параметрического отказа во времени с учетом всех деградационных процессов и их взаимосвязей на ЭВМ. Собранные статистические данные по множеству реализаций имитационной модели процесса параметрического отказа можно оценить все интересующие нас показатели надежности объекта.

ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОТКАЗА НА ЭВМ

Основными задачами имитационного моделирования параметрического отказа объектов на ЭВМ являются [5, 6]:

1) создание или использование существующих средств автоматизации имитационного моделирования;

2) создание концептуальной модели процесса параметрического отказа, которая включает:

- выбор способа описания процесса с непрерывным временем и непрерывным фазовым пространством на компьютере — дискретном устройстве, т.е. выбор значений и количества уровней дискретизации модельного времени и фазового пространства случайного процесса (СП);

- выбор способа изменения модельного времени;

- выбор способа организации квазипараллелизма нескольких деградационных СП в исследуемом объекте;

3) создание формальной модели, которая включает определение количества и состава деградационных факторов, а также характер их совместного влияния на объект;

4) компьютерная реализация имитационной модели с использованием выбранных средств автоматизации;

5) верификация и доказательство адекватности созданной имитационной модели;

6) планирование и проведение имитационного эксперимента, а также статистический анализ данных, полученных в процессе моделирования.

ВЫБОР СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОТКАЗА

Обзор существующих средств автоматизации имитационного моделирования показал, что:

- специализированные средства автоматизации имитационного моделирования параметрических отказов технических систем отсутствуют.

- универсальные средства имитационного моделирования (в том числе, непрерывных процессов, например, Simulink, Dymola, Arena, AweSim, Extend [5]) не специализируются на данной предметной области, а поэтому требуют существенной доработки (если таковая допускается).

- средства моделирования электронных устройств (Pspice, OrCAD, Electronics Workbench и др.) при реализации вероятностного физического моделирования также требуют существенной доработки.

Поэтому для моделирования параметрических отказов объектов предлагается использовать оригинальный пакет автоматизации имитационного моделирования СМ-ДЭС [7]. Пакет СМ-ДЭС предназначен для дискретно-событийного имитационного моделирования систем; реализует агрегатно-процессный способ формализации компонентов; организует квазипараллельное моделирование компонентов способом просмотра активностей; использует способ изменения модельного времени «шаг до следующего события» [6].

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОТКАЗА В СМ-ДЭС

Для моделирования параметрического отказа в СМ-ДЭС предполагается использовать три типа агрегатов. Агрегаты первого типа генерируют «элементарные» СП, модели которых широко известны [8]. Агрегаты второго типа предназначены для функционального преобразования одного или нескольких «элементарных» СП. Агрегаты третьего типа предназначены для сбора статистики о процессе параметрического отказа. Концептуальная модель параметрического отказа в СМ-ДЭС представлена на рис. 1.

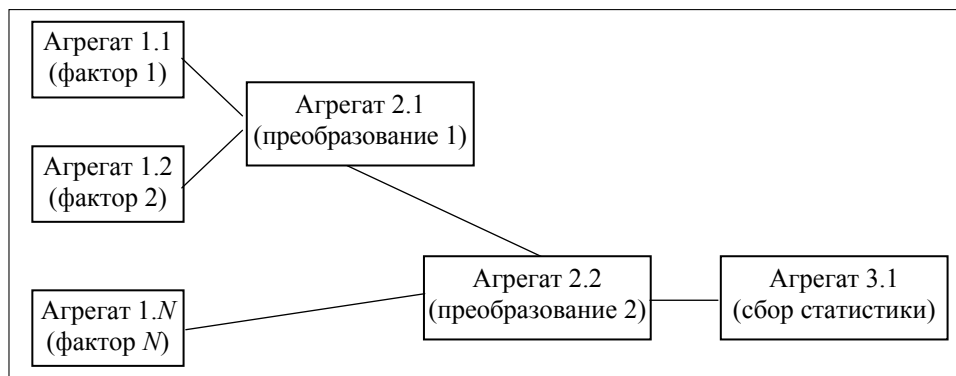


Рис. 1. Концептуальная модель параметрического отказа в пакете СМ-ДЭС (1.1. — 1.N — агрегаты первого типа; 2.1, 2.2 — агрегаты второго типа; 3.1 — агрегаты третьего типа)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В СМ-ДЭС

Описание и моделирование процесса параметрического отказа осложнено представлением СП с непрерывным временем и непрерывным фазовым пространством на ЭВМ (дискретном устройстве) и требует решения нескольких задач:

- (1) выбор количества уровней квантования значений непрерывных процессов и шага дискретизации шкалы времени;
- (2) выбор способа изменения модельного времени и способа организации квазипараллелизма при моделировании нескольких деградационных процессов.

Решение задачи (1) связано со следующими противоречивыми стратегиями: обеспечение большой точности моделирования для детальной и

правдоподобной имитации СП; обеспечение большой скорости моделирования. В частности, для обеспечения высокой точности следует увеличивать количество уровней квантования значений СП, уменьшать шаг шкалы времени, изменять модельное время «фиксированным шагом», равным выбранному шагу шкалы времени, или использовать способ изменения модельного времени «шаг до следующего события» при условии, что рассматриваемыми событиями являются изменения значений СП на один «квант». Для обеспечения высокой скорости, напротив, целесообразно использовать способ изменения модельного времени «шаг до следующего события».

Поскольку на различных этапах жизненного цикла имитационной модели (верификация, проверка адекватности, исследование и т.д.) к ней предъявляются разные требования (по точности и скорости), а также учитываемые деградационные процессы имеют существенно различающиеся размерности и динамический размах.

Поэтому возможности изменения количества уровней квантования значений непрерывных СП, величины «кванта» и шага шкалы времени целесообразно предоставить разработчику модели на этапе формального описания объекта моделирования [6]. Для возможности воспроизведения непрерывных СП с высокой точностью фазовое пространство значений сигналов агрегатов и модельного времени в СМ-ДЭС описывается вещественным типом Extended (в системе программирования Delphi), что обеспечивает точность значений состояний СП в 18–20 значащих цифр.

Решение задачи (2) обусловлено существующей реализацией пакета СМ-ДЭС (способ изменения модельного времени: «шаг до следующего события», способ организации квазипараллелизма: просмотр активностей [6]). Поэтому, в отличие от дискретных агрегатов (моделирующих процессы с двумя состояниями «логический 0» и «логическая 1»), время следующей активизации которых единообразно определяется в СМ-ДЭС только параметрами агрегатов, на аналоговые агрегаты наряду с функциями переходов и выходов возложена дополнительная функция собственной пассивизации. Назначение аналоговым агрегатом активности «самому себе» может происходить через фиксированный интервал времени (используется для моделирования временных рядов), а также интервал времени, необходимый для изменения значения непрерывного сигнала агрегата на один «квант». Данный способ целесообразно использовать для моделирования СП с непрерывным временем. Время до очередной активизации агрегата определяется методом линеаризации моделируемого СП в рассматриваемый момент модельного времени. Методическая погрешность воспроизведения СП в этом случае сокращается по мере уменьшения величины «кванта».

АГРЕГАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В СМ-ДЭС

Для моделирования широкого класса деградационных процессов, обуславливающих параметрический отказ технических объектов, в СМ-ДЭС реализованы агрегаты, генерирующие следующие известные СП, допускающие алгоритмическое описание (табл. 1), и агрегаты выполняющие следующие функциональные преобразования СП (табл. 2). Списки указанных агрегатов СМ-ДЭС могут дополняться.

Таблица 1. Случайные процессы, реализуемые агрегатами пакета СМ-ДЭС

СП с непрерывным временем	СП с дискретным временем
Веерный, диффузионный, марковский, полумарковский	Процесс с независимыми приращениями, процесс случайного блуждания, марковская цепь, ARMA, стационарный и нестационарный гауссовский СП с произвольным трендом, ARTA, ARCH, Gamma, TES

Таблица 2. Функциональные преобразования, реализованные агрегатами пакета СМ-ДЭС

Над одним СП	С двумя СП
Сравнение с константой (результат дискретный); сумма с константой; выбор минимального (максимального) значения в сравнении с константой; логарифмирование	Сравнение (результат дискретный); сумма; разность; произведение; отношение; выбор минимального (максимального) значения; среднее значение

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИЙ ПРОЦЕССА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОТКАЗА

Статистический анализ реализаций имитационной модели процесса параметрического отказа предполагается проводить по двум направлениям:

- Сбор статистики о реализациях СП параметрического отказа с целью оценки математического ожидания и дисперсии данного процесса. Т.к. процесс параметрического отказа не является эргодическим, то статистический анализ данного процесса необходимо проводить по множеству реализаций, полученных при одинаковых исходных данных и начальных условиях.
- Сбор статистики о реализациях наработки объекта до отказа — момента, когда значение процесса параметрического отказа выйдет из области допустимых значений. Если оценке подлежит только вероятность безотказной работы объекта, то моделирование процесса параметрического отказа можно проводить лишь в течение требуемой наработки (если при этом отказ не возник). Учитывая, что средняя наработка до отказа часто значительно превышает нормативную наработку, данный подход существенно уменьшает ресурсоемкость исследования.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ИМИТАЦИОННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Продemonстрируем пример имитационного моделирования параметрического отказа, для которого известно аналитическое решение и значения основных показателей надежности [2].

Если изменение во времени параметра X (например, зазор между элементами подвижного сопряжения, износ и т.п.) объекта происходит по линейному закону

$$X = \alpha + \gamma t, \quad (1)$$

где α — начальное значение параметра, γ — скорость изменения параметра X , подчиняющиеся нормальному распределению с параметрами $M[\alpha] = 10$ мкм, $\sigma[\alpha] = 2$ мкм, $M[\gamma] = 5 \times 10^{-10}$ мкм/мкс, $\sigma[\gamma] = 1 \times 10^{-10}$ мкм/мкс, то вероятность безотказной работы объекта определяется выражением [2]:

$$P(t) = \frac{1}{2} + \Phi \left(\frac{X_{\max} - M[\alpha] - M[\gamma]t}{\sqrt{(\sigma[\alpha])^2 + (\sigma[\gamma]t)^2}} \right), \quad (2)$$

где X_{\max} — максимально допустимое значение параметра X (например 50 мкм).

Имитационная модель рассматриваемого параметрического отказа в

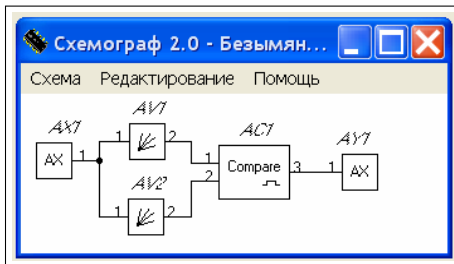


Рис. 2. Имитационная модель параметрического отказа в пакете СМ-ДЭС

пакете СМ-ДЭС представлена на рис. 2. Здесь [7] агрегат AV1 моделирует веерный процесс (1), его параметры задаются в специальном окне (рис. 3); агрегат AC1 — сравнивает текущее значение СП (1) с максимально допустимым значением параметра X , которое моделируется агрегатом AV2. Агрегаты AX1 и AY1 предназначены для управления моделированием.

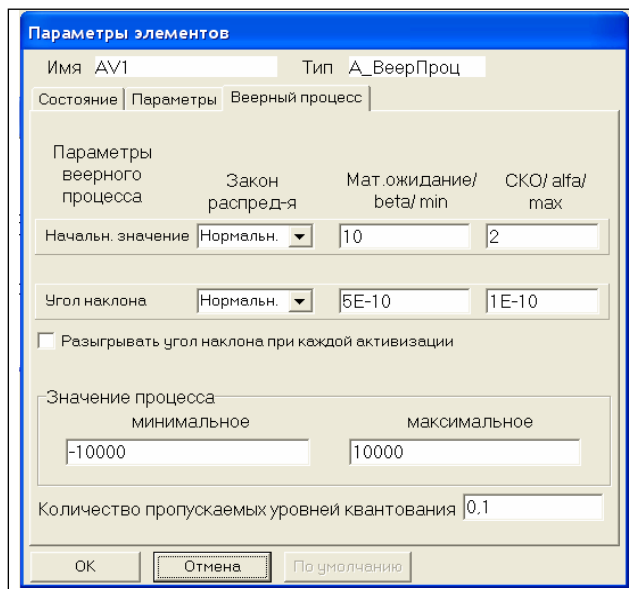


Рис. 3. Окно для доступа к характеристикам веерного СП в пакете СМ-ДЭС

Примеры реализации процесса параметрического отказа (1) в пакете СМ-ДЭС показаны на рис. 4, а на рис. 5 представлена гистограмма значений наработки объекта до отказа. По 8813 реализациям имитационной модели параметрического отказа оценка средней наработки объекта до отказа составила 23,273 часа ($\pm 0,5\%$ для доверительной вероятности 0,95), оценка стандартного отклонения — 5,571 часа.

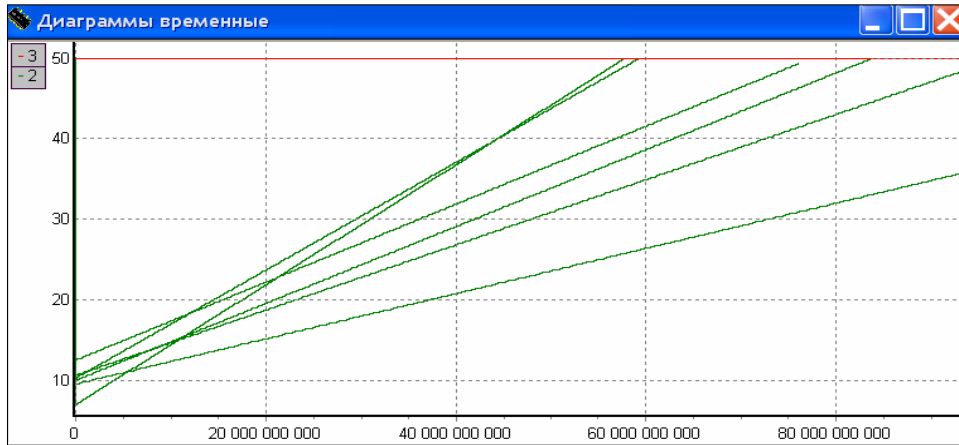


Рис. 4. Примеры реализаций веерного СП в СМ-ДЭС

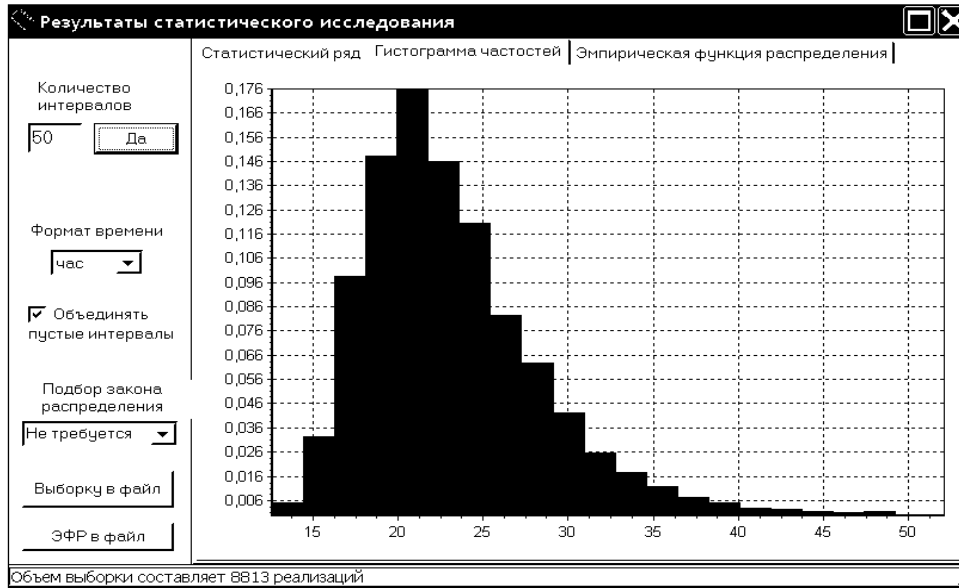


Рис. 5. Гистограмма наработки объекта до отказа в СМ-ДЭС

Сравнение вероятности безотказной работы объекта $P(t)$ по (2) и соответствующих статистических оценок $P_{\text{стат}}(t)$ в пакете СМ-ДЭС изображено на рис. 6.

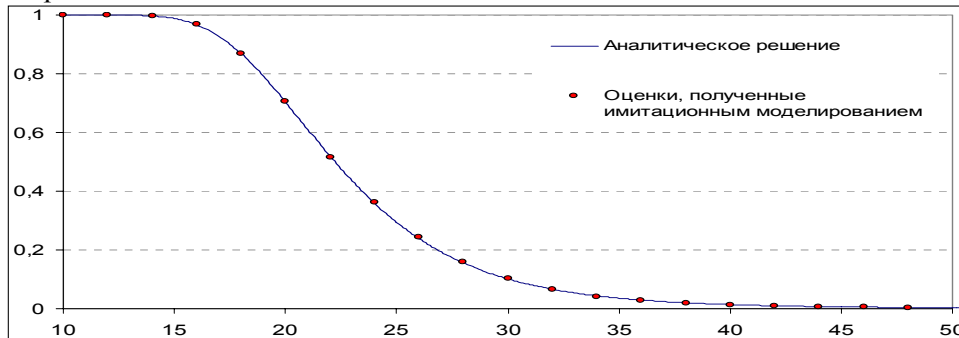


Рис. 6. Сравнение аналитического решения и результатов имитационного моделирования в пакете СМ-ДЭС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена технология моделирования параметрических отказов технических систем, которая является развитием вероятностного физического моделирования [4], но базируется на компьютерной имитационной модели. Кроме того, предложен программно-технологический комплекс автоматизации имитационного моделирования параметрических отказов. Представлен пример решения теоретической задачи анализа параметрического отказа механической системы с сопоставлением уже известных и вновь полученных результатов.

Предлагаемая технология и средства автоматизации имитационного моделирования параметрических отказов являются достаточно универсальными и позволяют решать широкий класс задач параметрической надежности механических и других технических систем. Они не имеют принципиальных ограничений на количество и характер влияния учитываемых деградационных факторов (в том числе, взаимного влияния), что определяет практическую значимость работы. Использование имитационного моделирования особенно актуально, когда аналитическое решение затруднено или задача не имеет законченной математической постановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Машиностроение*. Энциклопедия / Под общ. ред. В.В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2003. — 592 с.
2. *Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. Т.5: Проектный анализ надежности* / Под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы. — М.: Машиностроение, 1988. — 316 с.
3. *Проников А.С.* Параметрическая надежность машин. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 560 с.
4. *Дружинин Г.В.* Надежность автоматизированных систем: — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1977. — 536 с.
5. *Кельтон В., Лоу А.* Имитационное моделирование. Классика CS. — 3-е изд. — СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. — 847 с.
6. *Максимей И.В.* Имитационное моделирование на ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1988. — 232 с.
7. *Shevchenko D.N.* Program Technological Complex of a Research of Safety of Electronic Systems // Computer Data Analysis and Modeling: Robustness and Computer Intensive Methods: Proc. 6-th International Conference. — Minsk: BSU, 2001. — 2. — P. 208–213.
8. *Харин Ю.С., Малюгин В.И., Абрамович М.С.* Математические и компьютерные основы статистического анализа данных и моделирования: учеб. пособ. — Минск: БГУ, 2008. — 455 с.

Поступила 25.11.2009