Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Е. Зотеев, Сравнительный анализ методов определения динамических характеристик диссипативной системы, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2006, выпуск 43, 153–158

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu466>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.164.48.24

26 апреля 2023 г., 05:35:55

Использование предложенной методики позволяет получить требуемое распределение температуры изоляции на выходе из участка охлаждения, одновременно позволив уменьшить длину ванны до 30% по сравнению с типовыми техническими решениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э. Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. — М.: Наука, 2000. — 336 с.
2. Митрошин В. Н. Структурное моделирование процесса охлаждения изолированной кабельной жилы при ее изготовлении на экструзионной линии // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: «Технические науки», 2006. — № 40. — С. 22–33.
3. Зиннатуллин Р. Р., Труфанова Н. М., Шилинг А. А. Исследование процессов теплопереноса и фазовых превращений при охлаждении провода с полимерной изоляцией // V Минский междунар. форум по тепло- и массообмену (24–28 мая 2004 г.): Тез. докл. и сообщ. — Т. 2. — Минск, 2004. — С. 130–131.
4. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. — М.: Высш. шк., 2001. — 550 с.
5. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. — М.: Высш. шк., 2003. — 299 с.
6. Рапопорт Э. Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. — М.: Высш. шк., 2005. — 292 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1974. — 832 с.
8. Рапопорт Э. Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. — М.: Metallurgia, 1993. — 279 с.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 06-08-00041-а).

Поступила 26.10.2006 г.

УДК 519.246

В.Е. Зотеев

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИССИПАТИВНОЙ СИСТЕМЫ

На основе численно-аналитических исследований проводится сравнительный анализ эффективности различных методов определения динамических характеристик диссипативной системы с линейно-вязким трением. Результаты исследований позволяют сделать вывод о высокой помехозащищенности численного метода, в основе которого лежит среднеквадратичное оценивание коэффициентов линейно-параметрической дискретной модели в форме стохастического разностного уравнения колебаний диссипативной системы.

Современный уровень развития средств вычислений и обработки информации позволяет коренным образом изменить методы моделирования, идентификации и диагностики в машиностроении, внедрить в практику исследований демпфирующих свойств машин и механизмов статистические методы анализа и тем самым существенно повысить качество и достоверность результатов обработки экспериментальных данных. В частности, проблема внедрения новых информационных технологий успешно решена в области автоматизированного исследования вибрационных сигналов машин на основе цифрового спектрального анализа [1]. Однако получение достоверной оценки технического состояния диссипативной механической системы на основе анализа характеристик рассеяния энергии колебаний в процессе ее эксплуатации или прочностных промышленных испытаний до сих пор остается важнейшей проблемой в машиностроении. Традиционные методы определения диссипативных характеристик обычно используют результаты нескольких измерений либо огибающей амплитуд колебаний, либо амплитудно-частотной характеристики в методе кривой резонанса [2, 3].

Одним из наиболее распространенных среди известных методов определения характеристик рассеяния колебательной энергии является метод затухающих колебаний [2]. Он заключается в записи виброграмм свободных затухающих колебаний механической системы, по которым определяется логарифмический декремент колебаний. При малой диссипации энергии колебаний для определения декремента колебаний виброграмма разбивается на ряд участков с числом циклов n , зависящим от интенсивности убывания амплитуд. Среднее значение декремента на участке вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_i}{a_{i+n}}. \quad (1)$$

Полученный декремент приписывается средней амплитуде на данном участке $a_{i\text{cp}} = \frac{a_i + a_{i+n}}{2}$ или среднему амплитудному значению напряжения $\sigma_{i\text{cp}} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i+n}}{2}$. Вычисление декремента по программе затухающих колебаний обычно упрощают, используя приближенное равенство $\delta = \frac{\Delta a_i}{na_{i\text{cp}}}$, где $\Delta a_i = a_i - a_{i+n}$.

Погрешность определения декремента колебаний методом затухающих колебаний определяется в основном точностью измерения размахов колебаний. При предельной абсолютной погрешности Δ в измерении i -го размаха колебаний предельная относительная погрешность вычисления декремента может быть оценена по формуле

$$\Delta\delta = \frac{\Delta}{\Delta a_i}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что величина максимальной погрешности $\Delta\delta$ обратно пропорциональна разности амплитуд. Однако увеличение интервала между начальной и конечной амплитудами участка негативно сказывается на построении зависимости декремента колебаний от амплитуды. Это существенно ограничивает область применения данного метода.

Точность вычислений декремента колебаний методом затухающих колебаний, как правило, невелика и существенно зависит от величины случайной помехи в результатах измерений. Этот недостаток объясняется низким уровнем компьютеризации в информационных технологиях в машиностроении на момент разработки большинства из известных методов. Отдельные попытки частичной или полной компьютеризации и автоматизации процесса определения логарифмического декремента колебаний не затрагивали самой методологии, вследствие чего существенно повысить точность определения декремента колебаний не удавалось [4].

Принципиально решить проблему качественного изменения способа определения диссипативных характеристик механической системы можно только на основе новых математических моделей, ориентированных на применение современных методов параметрической идентификации и компьютеризацию алгоритмов вычислений. К таким моделям относятся линейно параметрические дискретные модели (ЛПДМ) в форме стохастических разностных уравнений колебаний диссипативной системы [5, 6]. Эти модели в виде рекуррентных формул описывают временные последовательности результатов измерений ординат колебаний механической системы. Они линейны относительно параметров (коэффициентов ЛПДМ), которые известным образом функционально связаны с динамическими характеристиками (ДХ) системы: частотой и декрементом колебаний, а также с характеристикой нелинейности диссипативной силы.

Оценка динамических характеристик диссипативной системы по результатам измерений ординат колебаний осуществляется в два этапа. Вначале вычисляются среднеквадратичные оценки коэффициентов ЛПДМ. Применение статистических методов обработки экспериментальных данных с использованием современных средств вычислений позволяет обеспечить высокую помехозащищенность полученных оценок в широком диапазоне изменения параметров динамического процесса в системе. На заключительном этапе по известным соотношениям вычисляются динамические характеристики системы, начальная амплитуда и фаза колебаний, а также оценивается погрешность результатов вычислений. Определение динамических характеристик через среднеквадратичные оценки коэффициентов ЛПДМ в форме стохастического разностного уравнения позволяет существенно повысить точность вычислений, обеспечить оперативность определения интересующих нас параметров, расширить функциональные возможности за счет оценки нелинейности диссипативной силы.

Для диссипативной системы с линейно вязким трением, свободные колебания которой описываются функцией $y(t) = a_0 \exp\left(-\frac{\delta t}{T}\right) \cos(\omega t + \psi_0)$, где ω , $T = \frac{2\pi}{\omega}$ и δ — частота, период и декремент колебаний, соответственно; a_0 и ψ_0 — начальные амплитуда и фаза колебаний, линейно параметрическую дискретную модель в форме стохастических разностных уравнений можно представить в виде

$$\begin{cases} y_0 = \lambda_3 + \varepsilon_0, \\ y_1 = \lambda_1 \frac{y_0}{2} + \lambda_4 - \frac{\lambda_1}{2} \varepsilon_0 + \varepsilon_1, \\ y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \eta_k, \\ \eta_k = -\lambda_2 \varepsilon_{k-2} - \lambda_1 \varepsilon_{k-1} + \varepsilon_k, \end{cases} \quad k = 2, 3, \dots, N-1. \quad (3)$$

Здесь $y_k = \mathcal{Y}(\tau k) + \varepsilon_k$ — результаты измерений ординат колебаний в моменты времени $t_k = \tau k$, $k = 0, 1, 2, \mathbf{K}, N-1$, τ — период дискретизации, N — объем выборки, ε_k — аддитивная случайная помеха в результатах измерений, η_k — эквивалентное случайное возмущение. Коэффициенты в модели (3) связаны с динамическими характеристиками диссипативной системы соотношениями:

$$\lambda_1 = 2 \exp\left(-\frac{\delta \tau}{T}\right) \cos \omega \tau, \quad \lambda_2 = -\exp\left(-\frac{2\delta \tau}{T}\right), \quad \lambda_3 = a_0 \cos \psi_0, \quad \lambda_4 = -a_0 \exp\left(-\frac{\delta \tau}{T}\right) \sin \omega \tau \sin \psi_0. \quad (4)$$

В матричной форме ЛПДМ, описывающая последовательность результатов измерений мгновенных значений экспериментальной виброграммы, имеет вид обобщенной регрессионной модели

$$\begin{cases} b = F\lambda + \eta, \\ \eta = P_\lambda \varepsilon. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)^T$ — вектор неизвестных коэффициентов линейно параметрической дискретной модели; $\varepsilon = (\varepsilon_0, \varepsilon_1, \mathbf{K}, \varepsilon_{N-1})^T$ — вектор случайной помехи в результатах наблюдений; $\eta = (\eta_1, \eta_2, \mathbf{K}, \eta_N)^T$ — вектор эквивалентного возмущения в стохастическом разностном уравнении; $b = (y_0, y_1, y_2, \mathbf{K}, y_{k-1}, \mathbf{K}, y_{N-1})^T$ — вектор правой части; F — матрица регрессоров размера $N \times 4$, столбцы которой описываются формулами: $f_{i1} = \left(0, \frac{y_0}{2}, y_1, y_2, \mathbf{K}, y_{k-2}, \mathbf{K}, y_{N-2}\right)^T$, $f_{i2} = (0, 0, y_0, y_1, y_2, \mathbf{K}, y_{k-3}, \mathbf{K}, y_{N-3})^T$, $f_{i3} = (1, 0, \mathbf{K}, 0)^T$, $f_{i4} = (0, 1, 0, \mathbf{K}, 0)^T$; P_λ — матрица размера $N \times N$ в стохастическом уравнении эквивалентного возмущения — нижняя треугольная, ленточная, трехдиагональная. Первый столбец матрицы P_λ имеет вид: $p_{i1} = \left(1, -\frac{\lambda_1}{2}, -\lambda_2, 0, 0, \mathbf{K}, 0\right)^T$. Остальные столбцы матрицы P_λ , $j = 2, 3, \dots, N$, описываются формулами:

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & 1 \leq i < j, & j = 2, 3, \dots, N, \\ 1, & i = j, & j = 2, 3, \dots, N, \\ -\lambda_1, & i = j+1, & j = 2, 3, \dots, N-1, \\ -\lambda_2, & i = j+2, & j = 2, 3, \dots, N-2, \\ 0, & j+3 \leq i \leq N, & j = 2, 3, \dots, N-3. \end{cases} \quad (6)$$

В основе помехоустойчивого метода определения ДХ системы с линейно вязким трением лежит среднеквадратичное оценивание коэффициентов обобщенной регрессионной модели (5). От того, насколько обоснованно и корректно будет выбран метод среднеквадратичного оценивания, существенно зависит точность вычисления коэффициентов ЛПДМ, а, следовательно, и динамических характеристик.

По найденным оценкам $\hat{\lambda}_j$ коэффициентов ЛПДМ динамические характеристики системы с линейно-вязким трением: частота ω и декремент δ колебаний, а также начальные амплитуда a_0 и фаза ψ_0 колебаний, вычисляются по формулам

$$\hat{\omega} = \frac{1}{\tau} \arccos \frac{\hat{\lambda}_1}{2\sqrt{-\hat{\lambda}_2}}; \quad \hat{\delta} = -\frac{\pi}{\omega \tau} \ln(-\hat{\lambda}_2);$$

$$\hat{a}_0 = \sqrt{\frac{4\hat{\lambda}_2\hat{\lambda}_3^2 + \hat{\lambda}_1^2\hat{\lambda}_3^2 - 4\hat{\lambda}_4^2}{4\hat{\lambda}_2 + \hat{\lambda}_1^2}}; \quad \hat{\psi}_0 = -\arctg \frac{2\hat{\lambda}_4}{\hat{\lambda}_3\sqrt{-4\hat{\lambda}_2 - \hat{\lambda}_1^2}}. \quad (7)$$

Задача определения динамических характеристик диссипативной системы по результатам наблюдений экспериментальной виброграммы не может считаться решенной до конца, если не дана оценка погрешности результатов вычислений. При использовании метода определения ДХ, в основе которого лежат среднеквадратичные оценки коэффициентов ЛПДМ в форме стохастического разностного уравнения, алгоритм оценивания погрешности результатов вычислений включает следующие этапы. Вначале находятся остатки $e = \hat{P}_\lambda^{-1}b - \hat{P}_\lambda^{-1}F\hat{\lambda}$, где $\hat{P}_\lambda$ — оценка матрицы P_λ , вычисленная по формулам (6) при $\lambda_j = \hat{\lambda}_j$, $j = 1, 2$. Затем вычисляется оценка

дисперсии s^2 случайной помехи ε_k в результатах измерений: $s^2 = \frac{1}{N-4} \sum_{k=1}^N (e_k - \bar{e})^2$, где

$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k$. На следующем шаге находятся оценки дисперсий и ковариаций для коэффициентов

ЛПДМ: $s^2[\hat{\lambda}_i] = c_{ii}s^2$, $\text{cov}[\hat{\lambda}_i, \hat{\lambda}_j] = c_{ij}s^2$, где c_{ij} — элементы матрицы $C = \left[F^T (\hat{P}_\lambda \hat{P}_\lambda^T)^{-1} F \right]^{-1}$.

На заключительном этапе вычисляются оценки среднеквадратичных отклонений $s[\hat{\omega}]$ и $s[\hat{\delta}]$ для динамических характеристик диссипативной системы:

$$s[\hat{\omega}] = \frac{1}{2\tau|\hat{\lambda}_2|\sqrt{-4\hat{\lambda}_2 - \hat{\lambda}_1^2}} \sqrt{4\hat{\lambda}_2^2 s^2[\hat{\lambda}_1] - 4\hat{\lambda}_1\hat{\lambda}_2 \text{cov}[\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2] + \hat{\lambda}_1^2 s^2[\hat{\lambda}_2]};$$

$$s[\hat{\delta}] = \sqrt{\left| \frac{\partial \delta}{\partial \lambda_1} \right|^2 s^2[\hat{\lambda}_1] + 2 \frac{\partial \delta}{\partial \lambda_1} \frac{\partial \delta}{\partial \lambda_2} \text{cov}[\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2] + \left| \frac{\partial \delta}{\partial \lambda_2} \right|^2 s^2[\hat{\lambda}_2]},$$

где $\frac{\partial \delta}{\partial \lambda_1} = -\frac{\pi \ln(-\hat{\lambda}_2)}{\hat{\omega}^2 \tau^2 \sqrt{-4\hat{\lambda}_2 - \hat{\lambda}_1^2}}$ и $\frac{\partial \delta}{\partial \lambda_2} = \frac{\pi(\hat{\lambda}_1 \ln(-\hat{\lambda}_2) - 2\hat{\omega} \tau \sqrt{-4\hat{\lambda}_2 - \hat{\lambda}_1^2})}{2\hat{\omega}^2 \tau^2 \hat{\lambda}_2 \sqrt{-4\hat{\lambda}_2 - \hat{\lambda}_1^2}}$. В качестве оценки пре-

дельной абсолютной погрешности вычисления динамических характеристик (с доверительной вероятностью p) можно использовать границу доверительного интервала, которая, например,

для декремента колебаний вычисляется по формуле: $\Delta \hat{\delta} = t_T s[\hat{\delta}]$. Здесь величина $t_T = t(\gamma, \nu)$

берется из таблицы распределения Стьюдента при числе степеней свободы $\nu = N - 4$ и уровне значимости $\gamma = 1 - p$. При доверительной вероятности $p = 0,99$ и объеме выборки $N \geq 15$ достаточно принять $t_T = 2,7$.

Проведены численно-аналитические исследования эффективности метода определения динамических характеристик на основе среднеквадратичного оценивания коэффициентов стохастического разностного уравнения. Целью таких исследований являлся сравнительный анализ погрешности вычисления декремента колебаний двумя различными способами: известным методом затухающих колебаний [2,4] и методом, в основе которого лежит линейно параметрическая дискретная модель в форме стохастических разностных уравнений (3). Численный эксперимент был организован следующим образом. Генерировалась выборка $\mathcal{X}$ дискретных значений с заданными параметрами: $\delta = 0,05$, $\omega = 2\pi$, $a_0 = 1$ и $\psi_0 = 0$. К отсчетам $\mathcal{X}$ добавлялась аддитивная помеха ε_k , величина которой в относительных единицах к мощности сигнала изменялась в промежутке от 0% до 10%. При оценке погрешности вычисления декремента колебаний использовался второй момент случайной величины $\hat{\delta}$ относительно ее истинного значения: $M[(\hat{\delta} - \delta)^2] = D[\hat{\delta}] + (M[\hat{\delta}] - \delta)^2$. Здесь $M[\cdot]$ — оператор математического ожидания, статистическая оценка которого находилась посредством усреднения 100 результатов вычислений для каждой точки эксперимента. При компьютерном моделировании метода затухающих

колебаний [2,4] использовалась формула $\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_i}{a_{i+n}}$ при числе циклов $n = 20$. Так как при моделировании не учитывалась методическая погрешность амплитудного детектора [4], то результаты вычислений имеют заведомо завышенную точность.

На рис. 1 представлены зависимости погрешности вычисления декремента колебаний от величины случайной помехи в результатах измерений при времени обработки экспериментальной виброграммы, равном $20T$, где T — период колебаний. Точки 1 соответствуют погрешности вычисления известным методом затухающих колебаний [2, 4], а точки 2, 3, 4 и 5 — погрешности вычисления декремента колебаний на основе стохастического разностного уравнения при объемах выборки $N = 100, 200, 400$ и 800 , соответственно. Очевидно, что увеличение объема выборки (при соответствующем уменьшении периода дискретизации τ с $0,2T$ до $0,025T$) позволяет повысить точность оценивания декремента колебаний по сравнению с известным методом более чем в десять раз.

Р и с. 1. Зависимости погрешности вычисления декремента колебаний от величины случайной помехи в результатах измерений при различных объемах выборки

Р и с. 2. Зависимости погрешности вычисления декремента колебаний от объема выборки при различном времени обработки экспериментальной виброграммы

На рис. 2 приведены зависимости погрешности вычисления декремента колебаний на основе ЛПДМ от объема выборки при мощности случайной помехи 5% и различном времени обработки экспериментальной виброграммы: $10T$, $20T$ и $40T$ (точки 1, 2 и 3). При этом погрешность вычислений известным методом равнялась 11,3, 7,2 и 6,5%, соответственно, что более чем на порядок выше погрешности, полученной при вычислениях с использованием ЛПДМ.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили высокую эффективность метода определения декремента колебаний на основе среднеквадратичных оценок коэффициентов линейно-параметрической дискретной модели в форме стохастических разностных уравнений. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Во-первых, в формате современных информационных технологий решена задача повышения достоверности определения динамических характеристик диссипативной системы по экспериментальной виброграмме.

Во-вторых, в основе нового метода определения характеристик рассеяния энергии колебаний механической системы лежит среднеквадратичное оценивание коэффициентов стохастического разностного уравнения, описывающего временную последовательность результатов измерения ординат колебаний.

В-третьих, предложенный метод обладает высокой эффективностью: позволяет на порядок увеличить точность вычислений по сравнению с известным методом. Возможность получения достоверных оценок за небольшие промежутки времени позволяет строить амплитудную зависимость декремента колебаний, которая является важнейшей характеристикой диссипативной силы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добрынин С. А., Фельдман М. С., Фирсов Г. И. Методы автоматизированного исследования вибраций машин: Справочник. — М.: Машиностроение, 1987. — 224 с.
2. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1971. — 376 с.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. — М.: Машиностроение, 1978. — 352 с.
4. Басков А. Г., Кратко А. Г., Бовсуновский А.П. и др. Автоматизированная система измерения характеристики демпфирования колебаний механических систем на основе микроЭВМ // Проблемы прочности, 1990. — № 1. С. 119–112.
5. Зотеев В. Е. Разработка и исследование линейных дискретных моделей колебаний диссипативных систем // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: «Физ–мат. науки», 1999. — № 7. — С. 170–177.
6. Зотеев В. Е., Попова Д. Н. Определение динамических характеристик нелинейных диссипативных систем на основе стохастического разностного уравнения // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: «Физ–мат. науки», 2006. — № 42. — С. 162–168.

Поступила 15.10.2006.

УДК 519.6(075.8)

В. К. Тяп

СТРУКТУРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Предложен структурный подход к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), позволяющий реализовать сходящийся алгоритм численного решения СЛАУ. Получено условие сходимости периодической структуры. Рассмотренный подход может быть использован для вычисления ряда линейных операторов.

Представим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) в виде следующего векторного уравнения:

$$Az = u, \quad (1)$$

где A — заданная матрица, z — искомый вектор, u — наблюдаемый вектор; $z \in F$, $u \in U$; F , U — некоторые нормированные пространства.

Если система линейных алгебраических уравнений невырождена, т.е. матрица A является квадратной и ее определитель не равен нулю ($\det A \neq 0$), то решение системы (1) запишется в следующем виде [1]:

$$z = A^{-1}u. \quad (2)$$

Во многих практических задачах, например в задачах синтеза систем управления, идентификации динамических объектов управления, сбора и обработки информации и ряде других задач, получаемая система алгебраических уравнений описывается операторным уравнением типа (1), при этом матрица A , как правило, является прямоугольной, что обусловлено условиями эксперимента и необходимостью получения достоверного результата [2–4].

В предлагаемой работе представлен алгоритм решения поставленной задачи с использованием бесконечных периодических структур.

Задача состоит в нахождении вектора z по вектору u . В случае квадратной матрицы, как отмечалось выше, уравнение (1) представляет собой систему n уравнений с n неизвестными. Решение в этом случае, если оно существует, находится однозначно в соответствии с (2). Если матрица прямоугольная, то уравнение (1) носит условный характер и решений может быть бесконечно много. Выбор решения, как правило, носит оптимизационный характер. С учетом вышесказанного, уравнению (1) соответствует структурная схема, представленная на рис. 1. Структурная схема оптимизационной постановки задачи представлена на рис. 2.

Сформулируем оптимизационную постановку решения СЛАУ, записанную в виде (1), не зависимо от вида матрицы A .

Данная структурная схема описывается системой векторных уравнений: