

# Моделирование дискретно-непрерывного движения системным алгоритмом *D-SELF*

А.Г. Иванов – Ростовцев, Л.Г. Колотило

**Аннотация** - Разработан алгоритм управления динамикой реальных систем. В основе алгоритма - пространственно-временная симметрия *D-SELF* параметров движения в открытых динамических системах. Рассчитан балансный, дискретно-непрерывный режим перемещения, как базовый для оценки устойчивости системы. Определены параметры и уравнения движения для балансных и реальных траекторий. Описана 5-ти шаговая процедура применения алгоритма. Приведены примеры моделирования для: оценки устойчивости нестационарного движения автомобиля, вибродиагностики ротора, стабилизации экспрессии генов в молекулярной биологии, циклорегуляции оборотных средств предприятия. Предложено использовать моделирование *D – SELF* для решения проектных, диагностических и адаптационных задач системной инженерии. Метод представлен как компактный и экономичный с точки зрения используемых ресурсов. Отмечены возможности алгоритма для управления движением системы, реализуемые при использовании внешних воздействий (ультразвук, магнитное поле), или при организации внутреннего регулирования (изменение элементов структуры системы).

**Ключевые слова** - алгоритм *D – SELF*, балансная траектория движения, уравнение движения, системные параметры.

## ВВЕДЕНИЕ

Дискретность и непрерывность – ключевые факторы описания любого движения [1] на произвольном интервале времени. Каждый непрерывный элемент при необходимости выражается посредством дискретных частей, и наоборот, дискретный элемент можно «развернуть» в непрерывном формате. Полнота картины движения достигается в случае совместного анализа двухфакторного движения.

Случайные сценарии перемещения объектов представляют множество траекторий, в которых с целью нормировки выделяются базовые сценарии пути, относительно которых путем сравнения (приближения, корреляции и т.д.) анализируются реально наблюдаемые случаи движения. К базовым относятся равномерное, прямолинейное, поступательное, вращательное и другие виды движения.

Следуя логике, нельзя исключать наличие специфических норм и алгоритмов движения, которые управляют динамикой реальных систем. Предлагается один из таких алгоритмов, который следует из пространственно-временной симметрии *D-SELF* в открытых динамических системах [2].

Системный алгоритм *D-SELF* содержит элементы дискретной (знакопеременной) периодичности, связанной со средней, непрерывной скоростью движения объекта.

При моделировании рассчитывается балансный сценарий системного перехода, представляющий режим движения в условиях динамического равновесия.

Для использования на практике, в задачу включаются необходимые дополнительные и второстепенные параметры движения согласно проектному заданию или наблюдаемому сложному объекту.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДВИЖЕНИЯ

**Исходные данные.** Рассматривается система с характерным размером  $L_0$  в состоянии *A*. Считается, что параметры (координаты) системы изменяются посредством собственной (эндогенной) либо внешней (экзогенной) активности. Любая активность – суть движение системы с определенной скоростью. Предельная, максимальная скорость, при достижении которой может возникнуть разрушение системы определяется как  $V_0$ . Из соотношения размерности вводится параметр характерного периода времени  $T_0 = L_0/V_0$ , смысл которого - разделение внутренних и внешних временных масштабов системы [2].

Предполагается, что для объекта существует состояние *D* с параметрами (координатами) отличными от состояния *A*. Переход между двумя стационарными (или неподвижными) состояниями *A* и *D* происходит за счет движения системы в течение промежутка времени  $t_{AD}$ .

**Задача.** Существует ли оптимальный (балансный) сценарий перехода системы из состояния *A* в состояние *D*, при котором динамику движения можно считать «максимально» устойчивой к воздействиям при «минимальном» сопротивлении со стороны внешней, окружающей среды?

**Системно-инженерное моделирование.** Задача движения рассматривается в контексте системной инженерии [3] междисциплинарного анализа сложных систем. Переход из состояния *A* в состояние *D* представляет особую траекторию «минимальной

Статья получена 6 июня 2022.

к.г.н. А.Г. Иванов – Ростовцев (agrstv@mail.ru)

к.г.н. Л.Г. Колотило (leondkilo@mail.ru)

Лаборатория проблем моделирования сложных систем,

Русское географическое общество, Санкт-Петербург

энтропии» между двумя стабильными, устойчивыми положениями объекта во внешней среде. В реальности, движущийся системный объект сопровождает целый комплекс локальных эндогенных и экзогенных процессов и нагрузок. Часть этих процессов стимулируют (например, ускоряют) системный переход. Другая часть нарушает динамическое равновесие и препятствует устойчивости перехода из  $A$  в  $D$ .

Многопараметрический системный объект представляет кластер структур, различающихся сложностью описания. В первом приближении, можно ограничиться минимальным числом ключевых параметров системы, которые соответствуют «жизненно важным» характеристикам, отражающим целостность, время жизни и устойчивость системного объекта [3]. Далее, задача дополняется другими параметрами, приближающими систему к реальным условиям с уточнением деталей и включением восторженных элементов.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

#### А. Моделирование параметров движения

При анализе динамики локальных геофизических объектов была отмечена устойчивая симметрия  $D-SELF$  между внутренними (относительно размеров объекта) и внешними масштабами движения [2]. Эффект наблюдался при [4] движении очагов землетрясений в литосфере, обтекании препятствий в гидросфере, циркуляции конвективных ячеек в атмосфере и в других процессах.

Экспериментальные исследования в контролируемых лабораторных условиях [5] подтвердили взаимосвязь  $D - SELF$  между параметрами непрерывного и дискретного движения [2,4]:

$$\begin{cases} V_i = \frac{L_0}{T_i} = \frac{V_0^2 T_i}{L_0} \\ T_0^2 = T_i T_i^* \end{cases} \quad (1)$$

где:  $V_i$  – скорость непрерывного движения;  $T_i$  и  $T_i^*$  – периоды пульсаций и осцилляций дискретного движения;  $L_0, T_0$  и  $V_0$  – характерные размер, период и предельная скорость (системные инварианты).

Зависимости (1) представлены графически на рис.1, где симметрия  $D-SELF$  проявляется в равных по модулю проекциях точек  $S$  и  $S^*$  на оси периодов пульсаций и осцилляций движущегося объекта.

Уравнение движения системного параметра объекта выражается (рис. 2):

$$L_i = V_i t + L_{ik} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i}\right) + L_{il}^* \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i^*}\right) \quad (2)$$

где:  $L_i$  – системный параметр объекта, движущегося с постоянной скоростью  $V_i$ ;  $t$  – текущее время;  $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$  – элементы стационарных (равные элементы) и нестационарных последовательностей амплитуд пульсаций и осцилляций, определяемых как:

$$\begin{cases} L_{ik} \in \{L_{ik}\}_{k=1}^m = L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ik}, \dots, L_{im}; & m = t_{AD}/T_i \\ L_{il}^* \in \{L_{il}^*\}_{l=1}^n = L_{i1}^*, L_{i2}^*, \dots, L_{il}^*, \dots, L_{in}^*; & n = t_{AD}/T_i^* \end{cases} \quad (3)$$

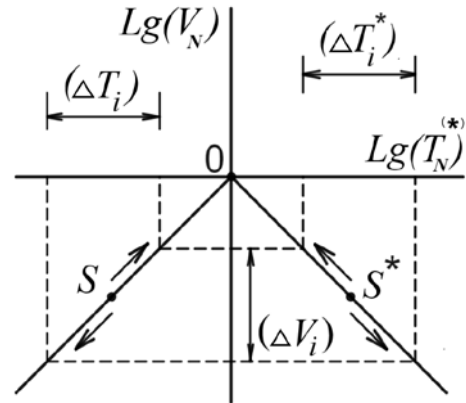


Рис. 1. Зависимость скорости движения  $V_N = V_i / V_0$  от периодов пульсаций и осцилляций  $T_N = T_i / T_0$ ,  $T_N^* = T_i^* / T_0$ . Сопреженные точки  $S$  (пульсации) и  $S^*$  (осцилляции), синхронно сближаются либо расходятся вдоль линий под  $45^\circ$  к осям координат при изменении скорости  $V_N$ . Диапазоны  $\Delta T_i$ ,  $\Delta T_i^*$  и  $\Delta V_i$  соответствуют границам устойчивости движения.

(3)

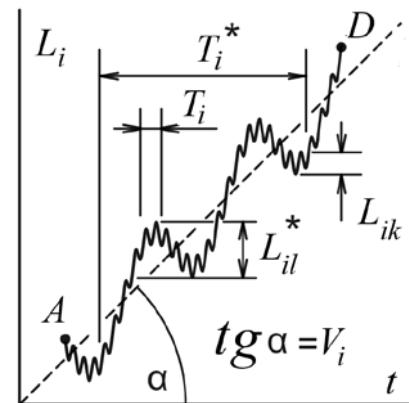


Рис. 2. Изменение во времени системного параметра  $L_i$  при переходе из точки  $A$  в точку  $D$  по балансной траектории со скоростью  $V_i$ , пульсациями и осцилляциями с периодами  $T_i$ ,  $T_i^*$  и с амплитудами  $L_{ik}$ ,  $L_{il}^*$  соответственно. Скорость  $V_i$  определяется углом наклона  $\alpha$  между пунктирной линией («средняя линия движения») и осью времени  $t$ .

В правой части (2) первое слагаемое отражает непрерывный фактор движения, а второе и третье – дискретный фактор соответственно. Для пульсаций и осцилляций выбран гармонический режим [4] при динамическом равновесии. В реальности,

периодическое движение может быть импульсным, с остановками, с инверсиями, или носить другой более сложный вид. При моделировании любая периодичность может аппроксимироваться базовым гармоническим движением со связями (1).

### В. Системный алгоритм D-SELF

На основе закономерностей (1) – (2) строится алгоритм моделирования как последовательность операций (стандартных действий), определяющих системные, текущие и граничные параметры движения объекта между стационарными состояниями  $A$  и  $D$ .

Процедура алгоритма *D-SELF* включает 5 шагов.

**Шаг 1.** *Определение системных параметров* ( $L_0, V_0, T_0$ ). Движение (переход) объекта описывается системным параметром движения  $L$ . Для механических систем – это величина перемещения в пространстве, энергетических – потоки мощности, химических – концентрации субстратов и реагентов, биологических – показатели роста молекул или организмов или волновые размеры для популяций, экономических – оборотные средства или товарные и денежные потоки т.д.

Для параметра  $L$  измеряются (или задаются) характерный размер  $L_0$  и предельная скорость движения  $V_0$ . Из (1) рассчитывается характерный период  $T_0 = L_0/V_0$ .

**Шаг 2.** *Моделирование балансного (базового) движения* ( $V_i, T_i, T_i^*, L_i$  рис. 2). Эмпирически или расчетным путем, оценивается скорость  $V_i$ , равная отношению приращения параметра движения  $L_{AD}$  (переход из  $A$  в  $D$ ) за «время жизни» [3]  $t_{AD}$  переходного периода объекта:

$$V_i = \frac{L_{AD}}{t_{AD}} \quad (4)$$

Из соотношений (1) рассчитываются периоды пульсаций и осцилляций  $T_i$  и  $T_i^*$ , величины которых анализируются, например, графически, как показано на рис.1 в виде положения точек  $S$  и  $S^*$ . Рассчитанные параметры подставляются в (2) для определения  $L_i$  (без амплитуд  $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$ ).

Базовый сценарий используется для дальнейшего моделирования и использования на практике. Этот режим выполняет роль базовой нормировки («нулевой уровень») при анализе многочисленных вариаций перехода объекта из  $A$  в  $D$  при усложнении условий задачи.

**Шаг 3.** *Определение амплитуд осцилляций и пульсаций* ( $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$ , рис. 2). Периодические (дискретные) движения объекта связаны со знакопеременными ускорениями при колебаниях средней скорости  $V_i$ . При нулевых амплитудах сопротивление среды блокирует пульсации и осцилляции. Движение происходит с «идеально» постоянной скоростью, что является математической абстракцией и в реальности не наблюдается. При значительных амплитудах периодичности движение «раскачивается» за счет автоколебаний, что приводит к потере устойчивости объекта.

Оптимальные и граничные значения амплитуд  $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$  определяются эмпирически или опытным путем для конкретных условий задачи.

**Шаг 4.** *Оценка граничных параметров* ( $\Delta V_i, \Delta T_i, \Delta T_i^*$ , рис. 1). Воздействия экзо – и эндогенных факторов ускоряют либо замедляют движение системы, изменяя время перехода  $t_{AD}$ . Ускоряющее воздействие увеличивает скорость  $V_i$  и сближает периоды  $T_i$  и  $T_i^*$  (рис. 1), а замедляющее – уменьшает  $V_i$  и «разводит в стороны»  $T_i$  и  $T_i^*$  (рис. 1). Уровни обоих типов максимальных воздействий определяют границы диапазонов  $\Delta V_i, \Delta T_i, \Delta T_i^*$ , которые численно наносятся на график рис. 1.

Величины  $L_0$  и  $V_0$  при изменении условий или сложности задачи также корректируются при моделировании движения.

**Шаг 5.** *Корреляция реального и балансного сценариев движения.* Устойчивость движения в реальных условиях оценивается путем сравнения реального перехода относительно балансного (базового). Для каждой задачи разрабатывается и анализируется корреляционная функция «близости» реального движения (перехода) и балансного.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ

Для иллюстрации применения алгоритма *D – SELF* представлены варианты моделирования объектов из различных областей. В первом примере анализируются переходные режимы движения автомобиля, во втором – вибродиагностика при вращении ротора, в третьем – устойчивость роста белковых молекул в геномной инженерии, в четвертом – циклорегуляция оборотного капитала предприятия.

### 4.1. Автомобиль Volkswagen Nardo W12 Coupe Concept

В процессе нестационарного движения автомобиля при разгоне или торможении регулярные участки с постоянной скоростью чередуются с режимами пульсаций и осцилляций скорости. Для оценки устойчивости такого движения важно иметь базовую, равновесную модель, относительно которой можно анализировать сложные траектории движения.

Рассматривается несколько вариантов перемещения автомобиля из точки  $A$  в точку  $D$  (рис. 3).

**Шаг 1.** Выбирается автомобиль *Volkswagen Nardo W12 Coupe Concept* [6] с максимальной скоростью движения  $V_0 = 350$  км/час и длиной  $L_0 = 4.5$  м, движущийся вдоль траектории «а» на рис. 1. Характерный период из (1) определится как:  $T_0 = L_0/V_0 = 46.44$  сек.

**Шаг 2.** Траектория движения «b» аппроксимируется тремя линейными отрезками  $AB, BC$  и  $CD$  с координатами граничных точек  $A$  (0 сек.; 0 м),  $B$  (45 сек.; 400 м),  $C$  (105 сек.; 4600 м) и  $D$  (150 сек.; 5000 м) на рис. 1. Моделирование *D – SELF* проводится для каждой из составляющих траектории «b».

Траектория «с» соответствует оптимальному, экономичному перемещению автомобиля из  $A$  в  $D$ , так как это кратчайшее расстояние между двумя точками. Данный случай может использоваться как балансный для сравнительного анализа реальных траекторий. Параметры траектории «с» и уравнение движения автомобиля рассчитываются на основании (1) – (2).

Траектория «b» представляет промежуточный вариант между балансной («с») и реальной («а»)

линиями. Каждый их трех линейных отрезков траектории «*b*» соответствует движению с собственными постоянными параметрами  $V_i$ ,  $T_i$  и  $T_i^*$ . Следуя логике, линейные отрезки «*b*» могут быть разбиты на меньшие отрезки, переходящие после дальнейших итераций в криволинейную функцию траектории «*a*».

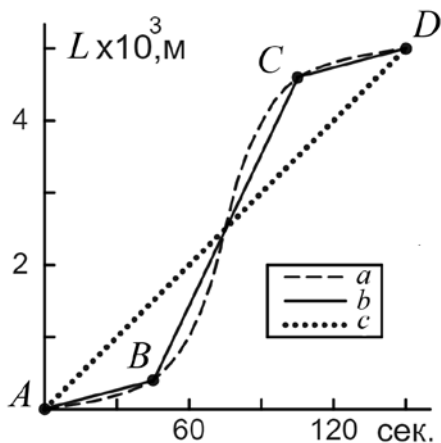


Рис. 3. Моделирование траекторий перемещения автомобиля: нелинейное движение (*a*), линейная аппроксимация (*b*), балансная модель алгоритма *D – SELF* (*c*).

**Шаг 3.** Анализ амплитуд  $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$  проводился на основе визуального моделирования при использовании вычислительного ресурса *DESMOS* [7]. Для всех траекторий рис. 1 выбрано значение  $L_{ik} = L_{il}^* = 0.05$  м. В реальных условиях для уточнения данных требуются натурные измерения виброперемещения,

виброскорости или виброускорения кузова автомобиля при различных режимах движения.

**Шаг 4.** Границы рабочего диапазона параметров  $V_i$ ,  $T_i$  и  $T_i^*$  движения определяются техническими характеристиками минимальных и максимальных величин оборотов вала, крутящего момента и мощности двигателя[6].

**Шаг 5.** Траектория «*a*» представляет криволинейную функцию, например, сигмоидальной формы. Движение сопровождается согласованным изменением параметров  $V_i$ ,  $T_i$  и  $T_i^*$  на основе (1). Алгоритм *D – SELF* может применяться для более сложной задачи, в которой моделирование нестационарного движения дополняется вибрациями работающего двигателя и вращения коленвала. Внутренние агрегаты и узлы автомобиля добавляют в анализ собственные резонансные спектры. Аппарат *D – SELF* используется здесь для согласования (синхронизации) локальных суб – и супергармоник системы относительно балансной, резонансной (нулевой [2]) частоты. Аналитическое описание многопараметрического уравнения движения  $L_{AD}$  для траектории «*a*» потребует значительных (кластерных) вычислительных ресурсов при решении задачи.

Результаты моделирования отдельных траекторий представлены в табл. 1. Параметры  $L_T$  и  $t_T$  соответствуют пространственному и временному масштабам траекторий (рис. 3).

В уравнениях движения табл. 1 под знаком синуса стоит размерный числовой сомножитель, соответствующий круговой частоте в герцах, и характеризующий дискретизацию (периодичность) движения. Данная операция используется и в последующих практических примерах.

Таблица 1. Моделирование параметров и уравнений движения автомобиля

Траектории движения (рис. 3)	Параметры движения					Уравнение движения, $L_i$ ; [ $L_i$ ] = [м], [ $t$ ] = [сек.]
	$L_T$ , м	$t_T$ , сек	$V_i$ , м/сек	$T_i^*$ , сек	$T_i$ , сек	
<i>c</i> (AD)	5000	150	33.3	0.135	0.016	$L_{AD} = 33.3 t + 0.05(\sin 47t + \sin 398t)$
<i>b</i> (AB)	400	45	8.9	0.506	0.004	$L_{AB} = 8.9 t + 0.05(\sin 12t + \sin 1570t)$
<i>b</i> (BC)	4200	60	70	0.064	0.033	$L_{BC} = 70 t + 0.05(\sin 98t + \sin 190t)$
<i>b</i> (CD)	400	45	8.9	0.506	0.004	$L_{CD} = 8.9 t + 0.05(\sin 12t + \sin 1570t)$
<i>a</i> (AD)	5000	150	~	~	~	(сигмоида)

#### 4.2. Асинхронный двигатель с частотным регулированием АДЧР 180 М8

Вращательное движение моделируется перемещением точки  $k$ , принадлежащей поверхности вала ротора (рис. 4). Системным объектом движения является цилиндрическая поверхность ротора.



Рис. 4. Вращение вала ротора относительно внешнего, неподвижного кольца подшипника. Точка  $k$  вращается с постоянной скоростью по окружности (непрерывное движение). Цилиндрическая поверхность вала (вместе с точкой  $k$ ) совершает вибрации (дискретное движение).

Выбирается электродвигатель с частотным регулированием АДЧР 180 М8 [8]: диаметр вала ( $d$ ) – 55 мм, скорость вращения вала ( $V$ ) – от 750 до 2250 оборотов в минуту.

**Шаг 1.** Системные параметры определяются для движения точки  $k$  на рис. 4:  $L_0 = \pi d = 172.7$  мм;  $V_0 = 1.25 V_{max} = (1.25 \times 2250 \times 172.7)/60 = 8095$  мм/сек;  $F_0 = 1/T_0 = V_0/L_0 = 8095/172.7 = 46.9$  Гц (характерная частота).

**Шаг 2.** Оптимальный, экономичный режим вращения вала ротора связан с вращением рабочего колеса вентилятора охлаждения. В АДЧР 180 М8 используется осевой вентилятор типа *EBM Papst* [8] с частотой вращения колеса 2580 об/мин. Согласованное вращение

вала и колеса соответствует скорости  $V_c = 2580/2 = 1290$  об./мин. для первой субгармоники вращения вентилятора. Данная скорость выбирается для балансного режима движения вала ротора:  $V_i = V_c L_0 = (1290 \times 172.7)/60 = 3713$  мм/сек. По формулам (1) и (2) рассчитываются частоты осцилляций и пульсаций, обратные соответствующим периодам, и уравнение балансного движения вала.

**Шаг 3.** Значения  $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$  амплитуд вибрационных смещений вала для частот  $F_i$  и  $F_i^*$  соответственно, рассчитываются по ГОСТу [9] при значениях виброскорости от 0.9 до 2.2 мм/сек для АДЧР 180 М8.

**Шаг 4.** Граничные значения частот  $\Delta F_i$ ,  $\Delta F_i^*$  и скоростей  $\Delta V_i$  рассчитываются по формулам (1) при  $F = 1/T$ . Границы  $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$  определяются уровнями естественного износа подшипника (рис. 4), зависящих от категории и условий эксплуатации электродвигателя.

**Шаг 5.** Дисбаланс ротора вызывает вибрации с частотой  $F_i$ , обусловленной вращением вала. Остаточный дисбаланс присутствует во всех, в том числе и в хорошо сбалансированных роторах. Если в агрегате присутствует механический или электромагнитный дефект с собственной частотой  $F_d$ , то дефектная вибрация будет стремиться создать собственный режим вращения вала со скоростью  $V_d = F_d \times L_0$ , препятствующий рабочему режиму на частоте  $F_i$ . Эффект влияния дефекта на параметры вращения вала может использоваться в практике вибродиагностики как «скрытая» дефектоскопия. Параметр корреляции отношения частот  $F_d/F_i$  отражает износостойкость подшипника и других узлов агрегата, влияющих на срок службы ротора.

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2. Моделирование параметров вращения и вибрации вала ротора электродвигателя

Группы параметров									
Системные			Балансные				Граничные		
$L_0$ , мм	$V_0$ , мм/сек	$F_0$ , Гц	$V_i$ , мм/сек	$F_i / F_i^*$ , Гц/Гц	$L_{ik} / L_{il}^*$ , мкм/мкм	$L_i$ [мм], $t$ [сек]	$\Delta V_i$ , мм/сек	$\Delta F_i / \Delta F_i^*$ , Гц / Гц	$\Delta L_{ik} / \Delta L_{il}^*$ , мкм/мкм
172.7	8095	46.9	3713	22/102	41/9	$L_i = 3713 t + 41 \sin(138 t) + 9 \sin(642 t)$	2159 – 6476	12.5 – 37.5 / 58.7 - 176	24 – 176 / 5 - 38

#### 4.3. Регуляция экспрессии гена *lacZ* при

##### метаболизме глюкозы

Ген *lacZ* регулирует концентрацию лактозы (составляющую углеводов) в молоке и молочных продуктах. При экспрессии *lacZ* генетическая информация переходит из молекулы ДНК в белок  $\beta$  – галактозидазу [10]. На первом этапе экспрессии, в процессе транскрипции, данный переход обеспечивается движением вдоль молекулы ДНК «молекулярной машины» – фермента РНКП (рис. 5).

Белок РНКП (рис.5) перемещается прерывисто, с остановками и ускорениями. Траектория складывается из локальных интервалов, разделенных транскрипционными паузами [11]. Временные периоды между паузами и амплитуды локальных движений изменяются в значительных пределах и выглядят хаотически. Вместе с тем, транскрипция и экспрессия генов в белковом синтезе представляют структурно-организованные процессы, которые должны управляться, как подчеркивалось в обзоре [11],

регулярными, системными закономерностями. Алгоритм *D – SELF* применяется для поиска и моделирования закономерностей генной экспрессии.

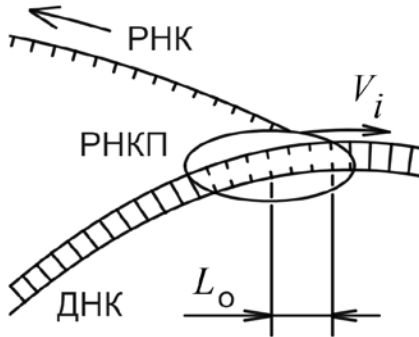


Рис. 5. Движение фермента РНКП (рибонуклеиновой кислоты полимераза) со скоростью  $V_i$ . РНКП «расплетает» двухцепочечную молекулу ДНК, считывает генетический код *lacZ* с кодонов  $L_0$  (триплеты нуклеотидов), и синтезирует транскрипт – одноцепочечную молекулу РНК, растущую со скоростью  $V_i$ .

Молекула ДНК представляет системное состояние *A*, а молекула РНК – состояние *D*. Рост РНК происходит за счет присоединения нуклеотидов или их триплетов – кодонов. В бактериальной клетке лактозного оперона, транскрипция (синтез РНК из последовательности нуклеотидов или кодонов) и трансляция (синтез первичного белка из последовательности аминокислот) не разделяются во времени. Скорости роста линейных молекул РНК и первичного белка, в первом приближении, соизмеримы. Тогда последовательность аминокислот (эквивалентов кодонов) может выполнять функцию конечного состояния *D*. Отсюда длину полного транскрипта (зрелая РНК) можно измерить количеством кодонов  $L_{AD}$ , эквивалентному количеству аминокислот в первичном белке.

При моделировании параметры роста молекул рассчитываются: для транскрипта в кодонах  $L_{AD}$ , и для первичного белка в дальтонах – молекулярных весах  $P_{AD}$  последовательности аминокислот (рис. 6). Экспрессия гена *lacZ* соответствует системному переходу генетического кода из точки *A* в точку *D2*. Устойчивость перехода определяется взаимно-однозначным соответствием генетической информации в начальном (*A*) и конечном (*D2*) состояниях.

**Шаг 1.** Предельная скорость роста «лабораторного» (in vitro) транскрипта оценивается как  $V_0 = 16.7$  код./сек. [12]. Объектом движения выбирается единичный кодон с параметром  $L_0 = 1$  код. (рис. 5). Из (1) определяется характерный период кодона:  $T_0 = L_0/V_0 = 0.06$  сек.

**Шаг 2.** Значения параметров гена *lacZ* определяются из базы данных *NCBI* [13]: молекулярный вес  $P_{AD} = 116.483$  кДа; количество кодонов (аминокислот)  $L_{AD} = 1024$  код. Предполагая, что время роста (созревания)

полного транскрипта составляет  $t_{AD2} = 180$  сек. (абсцисса точки *D2* на рис. 6), из (4) текущая скорость роста транскрипта равна:  $V_i = L_{AD}/t_{AD2} = 5.7$  код./сек.

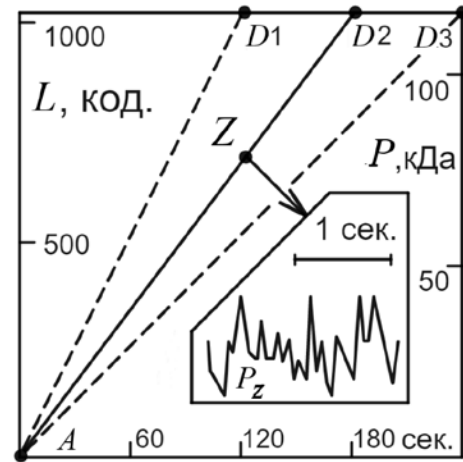


Рис. 6. Временные зависимости роста молекул РНК и первичного белка для гена *lacZ*: параметр  $L$  транскрипта (РНК) в кодонах, и параметр  $P$  молекулы первичного белка  $\beta$  – галактозидазы в кДа. *AD1* и *AD3* – границы рабочего диапазона транскрипции (трансляции). *AD2* – балансный (равновесный) режим движения роста. Локальные вариации величины  $P$  в окрестности точки *Z* показаны в выделенном фрагменте. Параметры точки *Z*:  $t_z = 126$  сек.,  $L_z = 717$  код.,  $P_z = 81.52$  кДа.

Траектория *AD2* соответствует баланскому росту транскрипта, для которого по формулам (1) рассчитываются параметры периодов пульсаций и осцилляций:  $T_i^* = L_0/V_i = 0.175$  сек.;  $T_i = T_0^2/T_i^* = 0.021$  сек.

Из (2) определяются два уравнения движения:  
- для кодонов (ось ординат слева на рис. 6):  
$$L_i = 5.7t + L_{ik} \sin(36t) + L_{il}^* \sin(299t),$$
  
где:  $0 \leq L_i \leq 1024$  код.,  $0 \leq t \leq 180$  сек.,  $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$  – стационарные последовательности (3);  
- для молекулярных весов (ось ординат справа на рис. 6):

$$P_i = 647t + P_{ik} \sin(36t) + P_{il}^* \sin(299t),$$
  
где:  $0 \leq P_i \leq 116.483$  Да,  $0 \leq t \leq 180$  сек.,  $V_{Pi} = P_{AD}/t_{AD} = 647$  Да/сек. – текущая скорость роста молекулярного веса транскрипта,  $P_{ik}$  – элементы стационарной последовательности,  $P_{il}^*$  – элементы нестационарной последовательности молекулярных весов аминокислот.

Элементы  $P_{il}^*$  численной последовательности взаимно-однозначно соотносятся с элементами  $A_l^*$  символьной последовательности аминокислот генетического кода *lacZ* ( $P_{il}^* \sim A_l^*$ ):

$$A_l^* \in \{A_l^*\}_{l=1}^n = M, T, M, \dots, C, Q, K = \text{метионин,}$$

треонин, метионин, ..., цистеин, глутамин, лизин

**Шаг 3.** Амплитуды  $P_{il}^*$  служат для записи генетического кода  $A_l^*$ . Для устойчивой экспрессии каждому кодону (аминокислоте) с номером  $l$  соответствует отдельный период  $T_i^*$  с временной координатой  $t_i$ . Значения амплитуд  $P_{il}^*$  для кодонов с  $l =$

700 – 735 [13] представлены в табл. 3 и на графическом фрагменте  $P_Z$  рис. 6.

Таблица 3. Молекулярные веса ( $P_l^*$ ) и текущие временные координаты ( $t_l$ ) аминокислот ( $A_l^*$ ) для последовательности кодонов с порядковыми номерами ( $l$ ) от 700 до 735 для гена *lacZ*

$l$ , кодон	$A_l^*$	$P_l^*$ , Да	$t_l$ , сек.	$l$ , кодон	$A_l^*$	$P_l^*$ , Да	$t_l$ , сек.	$l$ , кодон	$A_l^*$	$P_l^*$ , Да	$t_l$ , сек.
700	E	147	123.060	712	V	117	125.170	724	H	155	127.279
701	S	105	123.236	713	Q	146	125.345	725	I	131	127.455
702	A	89	123.412	714	P	115	125.521	726	S	105	127.631
703	G	75	123.587	715	N	132	125.697	727	A	89	127.807
704	Q	146	123.763	716	A	89	125.873	728	W	204	127.982
705	L	131	123.939	717	T	119	126.049	729	Q	146	128.158
706	W	204	124.115	718	A	89	126.224	730	Q	146	128.334
707	L	131	124.291	719	W	204	125.400	731	W	204	128.510
708	T	119	124.466	720	S	105	126.578	732	R	174	128.686
709	V	117	124.642	721	E	147	126.752	733	L	131	128.861
710	R	174	124.818	722	A	89	126.928	734	A	89	129.037
711	V	117	124.994	723	G	75	127.103	735	E	147	129.213

**Шаг 4.** Согласно [12], скорость роста транскрипта соответствует диапазону  $\Delta V_i = 3.3 - 11.6$  код./сек. Отсюда рабочие режимы скорости выбираются в пределах  $\Delta V = 4.2 - 8.5$  код./сек., с граничными траекториями  $AD1$  при  $t_{AD1} = 120$  сек. и  $AD3$  при  $t_{AD3} = 240$  сек. (рис. 6). Выбор текущего параметра  $t_{AD2} = 180$  сек. (Шаг 4 является корректным, так как данное значение находится между  $t_{AD1}$  и  $t_{AD3}$ ).

**Шаг 5.** Балансный сценарий определяет оптимальную траекторию движения РНКП (рис. 5). Пульсации РНКП локализуют генетическую информацию на временных интервалах  $T_i$ . Амплитуды пульсаций, пропорциональные  $P_{il}^*$ , взаимно-однозначно соответствуют генетическому коду  $A_l^*$ . Корреляция реальных транскриптов и их балансных сценариев определяет уровень помехозащищенности генетической информации. Чем ближе реальный процесс к балансному, тем меньше вероятность ошибок при переносе генетической информации из ДНК в РНК, и далее в белок  $\beta$  – галактозидазу. Корреляционная функция играет роль интегрального показателя при выборе внешних условий и необходимых ферментов для стабилизации (устойчивости) экспрессии при получении высокостабильного конечного белка.

В динамическом программировании, например в методах множественного выравнивания [14], алгоритм балансного движения роста молекулы РНК может использоваться в качестве базовой весовой матрицы положения, что позволит понизить сложность задачи и уменьшить объем вычислительных ресурсов.

#### 4.4. Циклорегуляция компании Colgate Palmolive

Управление предприятием зависит от многочисленных факторов, часть которых носит случайный, непредсказуемый характер. При этом ритмичность работы «защищает» предприятие от неравновесных воздействий и повышает устойчивость

компания. Периоды производственных, финансовых и управленческих циклов также изменяются во времени и требуют дополнительного анализа их динамики.

Для моделирования циклов оборотных средств предприятия применяется алгоритм  $D - SELF$ . На примере компании *Colgate Palmolive (CL)* [15] показывается возможность снижения затрат и повышения прибыльности посредством циклорегуляции в период 07/2017 – 12/2021.

**Шаг 1.** Системный параметр движения  $L_0$  – величина оборотных средств (сумма акционерного капитала и долгосрочных обязательств), рассчитывается как среднеарифметическое из среднегодовых значений величин  $L_{0j}$  (табл. 4):

$$L_0 = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 L_{0j} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 (L_{1j} - L_{2j} + L_{3j}) = 10.32 \text{ млрд. долл.}$$

где показатели на конец года:  $L_{0j}$  – оборотные средства;  $L_{1j}$  – всего обязательств;  $L_{2j}$  – краткосрочные обязательства;  $L_{3j}$  – акционерный капитал.

Оценка  $V_0$  производится по данным за период 2017 – 2021 г. из [15]:

$$V_0 \approx \frac{16 \cdot 100 \%}{0.6 (36 \% + 42 \%)} = 34.19 \text{ млрд. долл./год}$$

где: 16 млрд. долл. – среднегодовая общая выручка *CL* (средние значения  $L_B$  в табл. 4); 0.6 – доля *CL* на мировом рынке косметических услуг [16]; 36% и 42% – удельный вес *CL* в мировом производстве зубных щеток и паст соответственно [16].

Смысл величины  $V_0$  заключается в теоретически возможной монополизации доходности мирового рынка номенклатуры *CL*.

Из соотношений (1) определяется  $T_0 = 10.32/34.19 = 0.30$  лет = 3.6 мес.

Таблица 4. Оборотные средства и доходы CL [16]

Оборотные средства					Доходы			
Дата	$L_{1j}$	$L_{2j}$	$L_{3j}$	$L_{0j}$	Период	$L_B$	$L_{П}$	$L_C$
	млрд. долл.					млрд. долл.		
31.12.17	12.74	3.41	-0.06	9.27	07-12/2017	7.36	0.93	6.43
31.12.18	12.26	3.34	-0.10	8.82	01-06/2018	7.89	1.27	6.62
31.12.19	14.92	4.04	0.12	11.00	07-12/2018	7.66	1.13	6.53
31.12.20	15.18	4.40	0.74	11.52	01-06/2019	7.75	1.15	6.60
31.12.21	14.43	4.05	0.61	10.99	07-12/2019	7.94	1.22	6.72
				10.32	01-06/2020	7.79	1.27	6.52
					07-12/2020	8.48	1.35	7.17
					01-06/2021	8.60	1.36	7.24
					07-12/2021	8.86	1.42	7.44
					07/2017-12/2021	72.33	11.1	61.23

**Шаг 2.** Оборотные средства формируют поток движения материальных ресурсов предприятия.

*Непрерывный фактор* потока определяется скоростью  $V_i$  движения параметра  $L_0$ , и рассчитывается по формуле (3):  $V_i = 61.23/4.5 = 13.61$  млрд. дол./год, где себестоимость товарного потока  $L_C$  за 4.5 года определяется как разность общей выручки  $L_B$  и чистой прибыли  $L_{П}$ :  $L_C = L_B - L_{П} = 72.33 - 11.1 = 61.23$  млрд. долл. (табл. 4).

*Дискретный фактор* связан с пульсациями и осцилляциями движения, периоды которых по формулам (1) равны:  $T_i = 10.32/13.61 = 0.76$  года = 9.12 мес.;  $T_i^* = 0.3^2/0.76 = 0.12$  года = 1.44 мес.

Режим балансного движения (траектория  $AD$  на рис. 7) с рассчитанными параметрами  $V_i = V_{D1}$ ,  $T_i = T_D$  и  $T_i^* = T_D^*$  описывается уравнением:

$$L_i = 13.6t + L_{ik} \sin(52t) + L_{il}^* \sin(8t).$$

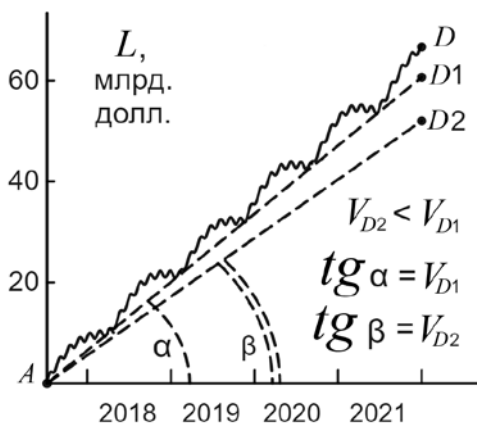


Рис. 7. Движение оборотных средств  $L$  с нарастающим итогом в течение 4.5 – летнего периода. Траектории  $L$ :  $AD$  - дискретно-непрерывный режим с периодическими пульсациями и осцилляциями;  $AD1$  и  $AD2$  –

непрерывные, линейные режимы с постоянными скоростями  $V_{D1}$  и  $V_{D2}$  соответственно. Уменьшение угла наклона траекторий к оси времени ( $\beta < \alpha$ ) соответствует замедлению движения оборотных средств при сохранении (либо повышении) прибыльности компании за счет циклорегуляции.

**Шаг 3.** Амплитуды периодических движений определяются при моделировании движения объемов товарного потока компании.  $L_{ik}$  и  $L_{il}^*$ , и рассчитываются как стоимости объемов оптимальных партий товара, произведенных за периоды  $T_i$ , а  $T_i^*$  соответственно.

**Шаг 4.** Границы скорости  $\Delta V_i$  (рис. 1) определяются исходя из прибыльности и степени организационной «детализации» производственно-хозяйственной деятельности. Верхняя граница  $\Delta V_i$  определяется режимом работы с нулевой прибылью в точке безубыточности, а нижняя - режимом предельной, избыточной регламентации всех ресурсных циклов при максимальной «зарегулированности» предприятия.

**Шаг 5.** Алгоритм  $D - SELF$  реализует режим циклорегуляции для уменьшения оборотных средств и увеличения прибыльности компании. Изменяя скорость от  $V_{D1} = 13.61$  до значения  $V_{D2} = 11.83$  млрд. долл./год (рис. 7) оборотные средства снижаются на 13%. Циклорегуляция заключается в переходе предприятия из циклорежима с  $T_{D1}$ ;  $T_{D1}^*$  в циклорежим с  $T_{D2}$ ;  $T_{D2}^*$ , где  $T_{D2}^* = T_{D1}^*$ , а  $T_{D2} = T_{D1} (V_{D2} / V_{D1})^2$ . Оценки показывают, что циклорегуляция  $D - SELF$  повышает прибыльность компании до 15 – 20 %.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм  $D - SELF$  используется для управления сложными системами в движении или в состоянии перехода. Моделирование направлено для решения проектных, диагностических и адаптационных задач системной инженерии. Метод представляется как



компактный и экономичный с точки зрения используемых ресурсов.

**При проектировании** новых систем для одного (или нескольких) системных параметров движения синтезируется балансный, равновесный режим функционирования относительно устойчивости к нагрузкам. Рассчитываются параметры границ рабочего режима, и моделируются сценарии изменения параметров внешней среды с последующей реакцией системных и текущих параметров системы. Алгоритм  $D - SELF$  интегрально учитывает величину внешнего воздействия на систему путем реакции в виде согласованного изменения параметров скорости  $V_i$  и периодов  $T_i, T_i^*$  в рабочем диапазоне. Если воздействие достаточно сильное, то системе не хватает «запаса прочности», реакция выходит за пределы устойчивости, и движение системы блокируется.

**При диагностике** систем измеряются частотные и временные спектры наблюдаемых параметров. Полученные данные сравниваются с расчетными параметрами балансного режима системы, и анализируется корреляция между балансными и наблюдаемыми значениями. В результате анализа принимается решение о текущей устойчивости системы относительно балансного режима, и корректируются рабочие параметры с целью их приближения к балансным значениям.

**При адаптации** проектируемых или работающих систем к текущим и предельным нагрузкам алгоритм  $D - SELF$  используется для активного управления. На систему оказывается управляющее воздействие с периодами  $T_i$  и  $T_i^*$ , объект «подстраивается» под заданный сценарий движения и адаптируется к новым условиям. Управляющий режим реализуется при использовании внешних воздействий (например, ультразвук или магнитное поле), или при организации внутреннего регулирования (например, изменение элементов структуры системы).

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Манеев А.К. *Философский анализ зеноновских апорий*. – Минск: Наука и техника, 1972. -196 с.
2. Дегтярев Г.М., Иванов-Ростовцев А.Г., Колотило Л.Г., Любченко О.А. *Пространственно-временная симметрия в открытых динамических системах (Модель  $D - SELF$ )* // Доклады Академии Наук СССР. – 1990. – Т.315, № 5. – С. 1108 – 1111.
3. Николенко В.Ю. *Базовый курс системной инженерии: учебное пособие*. – М.: МФТИ, 2018. – 330 с.
4. Иванов-Ростовцев А.Г., Колотило Л.Г., Тарасюк Ю.Ф., Шерстянкин П.П. *Самоорганизация и саморегуляция природных систем (модель, метод и основы теории  $D - SELF$ )*. – СПб: Русское географическое общество, 2001. – 216 с.
5. Иванов-Ростовцев А.Г. *Экспериментальные исследования зависимости влияния геометрии стержня на его диаграмму рассеяния звука в воде* // Акустический журнал. – 1991. – Т.37, № 2. – С. 398 – 400.
6. Технические характеристики Volkswagen W12 Nardo (Concept) 6.0 W12 (600 лс) - online; accessed: <http://auto-data.net/ru/volkswagen-w12-nardo-concept-6.0-w12-600hp-9062> (online; accessed: 2022-06-06)
7. Графический калькулятор визуализации сложных функций - online; accessed: <http://desmos.com> (online; accessed: 2022-06-06)
8. Электродвигатели АДЧР частотного регулирования производства ООО НПО СПЕЦЭЛЕКТРО - online; accessed: [http://se33.ru/pdf/katlog\\_adchr.pdf](http://se33.ru/pdf/katlog_adchr.pdf) (online; accessed: 2022-06-06)
9. ГОСТ ИЕС 60034 – 14 – 2014. *Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов*

*машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций*. – М.: Стандартинформ, 2015.–10 с.

10. Пиневич А.В. *Микробиология. Биология прокариотов: учебник*. В 3-х томах. Том 3. – СПб: Издательство СПб университета, 2009. – 457 с.

11. Kang J.Y., Mishanina T.V., Landrick R., Darst S.A. *Mechanisms of Transcriptional Pausing in Bacteria* // Journal of Molecular Biology. – 2019. – Sep.20; 431 (20). – P. 4007 -4029.

12. Uptain S.M., Kane C.M., Chamberlin M.J. *Basic mechanisms of Transcript Elongation and its Regulation* // Ann. Review Biochemistry. – 1997. – V.66. – P. 117 – 172.

13. *National Center for Biotechnology Information (NCBI)* - online; accessed: <http://ncbi.nlm.nih.gov/gene/945006> (online; accessed: 2022-06-06)

14. Frenkel F.E., Skryabin K.G., Korotkov E.V. *WEB – server for search of a periodicity in amino acid and nucleotid sequences*//Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2017. – V.937. – P. 012013.

15. Официальный сайт компании Colgate Palmolive - online; accessed: <http://colgatepalmolive.com> (online; accessed: 2022-06-06)

16. Финансовые отчеты Colgate-Palmolive Company (CL) - online; accessed: <http://ru.investing.com> (online; accessed: 2022-06-06); Colgate-Palmolive Company общая выручка, чистый доход и динамика изменения - online; accessed: <http://ru.allstockstoday.com> (online; accessed: 2022-06-06)

# Simulation of Discrete-Continuous Motion by the *D-SELF* Algorithm

A.G. Ivanov – Rostovtsev, L.G. Kolotilo

**Abstract** - An algorithm for controlling the dynamics of real systems has been developed. The algorithm is based on the space-time symmetry of D-SELF motion parameters in open dynamical systems. A balanced, discrete-continuous mode of displacement is calculated as a base for assessing the system stability. The parameters and equation of motion for balanced and real trajectories are determined. A 5-step procedure for applying the algorithm is described. Examples of modeling are given for: assessing the stability of the unsteady movement of the car; vibration diagnostics of the rotor; stabilization of gene expression in molecular biology; cycle-regulation of current assets of the company. It is proposed to use D- SELF modeling to solve design, diagnostic and adaptation objectives of system engineering. The method is presented as compact and economical in terms of resources used. The possibilities of the algorithm to create a control mode implemented at external influence (ultrasound, magnetic field), or at organizing internal regulation (changing the elements of the system structure) are noted.

**Keywords** - D – SELF algorithm, balanced motion trajectory, equation motion, system parameters.

## REFERENCES

1. Maneev A.K. *Philosophical analysis of Zeno's Aporias*. – Minsk: Science and technology, 1972. – 196 p.
2. Degtyarev G.M., Ivanov-Rostovtsev A.G., Kolotilo L.G., Lyubchenko O.A. *Space – time symmetry in open dynamical systems (D – SELF Model)* // Soviet Physics Doklady. – 1990. – Vol.315, № 12. – P. 1062 - 1064
3. Nicolenko V.Yu. *Basic course of system Engineering: textbook*. – Moscow: MIPT, 2018. – 330 p.
4. Ivanov-Rostovtsev A.G., Kolotilo L.G., Tarasyuk Yu. F., Sherstyankin P.P. *Self - Organization and Self – Regulation of Natural Systems (Model, Method and the Foundation of the D – SELF Theory)*. – St.Petersburg: Russian Geographical Society, 2001. – 216 p.
5. Ivanov-Rostovtsev A.G. *Experimental studies of the influence of the geometry of a rod on its angular scattering diagram in water* // Soviet Physics. Acoustics. -1991. – Vol.37, № 2. – P. 202 -203
6. Technical specifications Volkswagen W12 Nardo (Concept) 6.0 W12 (600 лс) - online; accessed: <http://auto-data.net/ru/volkswagen-w12-nardo-concept-6.0-w12-600hp-9062> (online; accessed: 2022-06-06)
7. Graphical calculator for visualizing complex functions - online; accessed: <http://desmos.com> (online; accessed: 2022-06-06)
8. ADCR frequency control electric motors manufactured by NPO SPETSELEKTROD LLC - online; accessed: [http://se33.ru/pdf/katlog\\_adchr.pdf](http://se33.ru/pdf/katlog_adchr.pdf) (online; accessed: 2022-06-06)
9. IEC 60034 – 14:20018. *Rotating electrical machines - Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher - Measurement, evaluation and limits of vibration severity*. – International Standard, 2018. – 37 p.
10. Pinevich A.V. *Microbiology. Biology of prokaryotes: textbook*. In 3 volumes. Vol.3. -St.Petersburg: St. Petersburg University Press, 2009. – 457 p.
11. Kang J.Y., Mishanina T.V., Landrick R., Darst S.A. *Mechanisms of Transcriptional Pausing in Bacteria* // Journal of Molecular Biology. – 2019. – Sep.20; 431 (20). – P. 4007 -4029.
12. Uptain S.M., Kane C.M., Chamberlin M.J. *Basic mechanisms of Transcript Elongation and its Regulation* // Ann. Review Biochemistry. – 1997. – V.66. – P. 117 – 172.
13. *National Center for Biotechnology Information (NCBI)* - online; accessed: <http://ncbi.nlm.nih.gov/gene/945006> (online; accessed: 2022-06-06)
14. Frenkel F.E., Skryabin K.G., Korotkov E.V. *WEB – server for search of a periodicity in amino acid and nucleotid sequences*//Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2017. – V.937. – P. 012013.
15. Official website of the Colgate Palmolive company - online; accessed: <http://colgatepalmolive.com> (online; accessed: 2022-06-06)
16. Colgate-Palmolive Company Financial Statements (CL) - online; accessed: <http://ru.investing.com> (online; accessed: 2022-06-06); Colgate-Palmolive Company: total revenue, net income and dynamics of change - online; accessed: <http://ru.allstockstoday.com> (online; accessed: 2022-06-06)