

**ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА В СИСТЕМЕ
УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ В
ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ,
ОСНОВАННОМ НА ЭНТРОПИИ ПОКРЫТИЯ**

Сухов А.В., Прокопенко В.С.

В информационном пространстве отношений между элементами системы управления сложным техническим комплексом рассмотрены математические модели информационных потоков. На основе анализ информационных потоков в узлах системы оптимизирован информационный ресурс ее элементов.

Ключевые слова: эргасистема; информационная система; информационный ресурс; энтропия покрытия; обобщённая энтропия покрытия; информационное пространство отношений; стохастические дифференциальные уравнения вектора состояния.

UDC 681.513.6

**OPTIMIZATION OF THE INFORMATION RESOURCE IN A CONTROL
SYSTEM OF A DIFFICULT TECHNICAL COMPLEX IN THE
INFORMATION FIELD BASED ON COVERING ENTROPY**

Sukhov A.V., Prokopenko V.S.

In information field based on covering entropy of relations between control system elements the difficult technical complex considers mathematical models of information streams. On a basis of the analysis of information streams in system knots is optimized an information resource of its elements.

KEYWORD: Erg - system; information system; information resource; covering entropy; the generalized covering entropy; an information field; the stochastic differential equations of a condition vector.

Современная система управления сложным техническим комплексом (СУ СТК) по существу является информационной системой и в более широком смысле – эргасистемой. В системе управления реальный обмен ресурсами между элементами, упорядочение потоков ресурсного обмена осуществ-

ляет субъект системы управления, управляющий объект, принимающий решения и управляющий объектами, процессами или отношениями путём воздействия на управляемую систему для достижения поставленных целей.

Рассматривается подход, основанный на отображении предметной области отношений в информационное пространство и формировании управляющих воздействий в информационной области отношений. При этом состояние элементов информационной системы представляется *динамикой информационного ресурса* в узлах.

Информационное пространство основано на использовании информационной меры – энтропии покрытия (ЭП) [1]. В работах [2, 3] показано, что такая мера образует метрическое пространство и определены основные свойства этой меры. В информационном пространстве используется также обобщённая энтропия покрытия, описывающая состояние информационного ресурса. Значения этой функции являются комплексными величинами [1].

Мнимая часть обобщённой энтропии покрытия отражает степень недостаточности по отдельным компонентам вектора ресурсов элемента СУ. Действительная часть отражает степень избыточности ресурсов по другим компонентам вектора ресурсов. Проекция на информационное пространство отражает степень информационной полезности элемента СУ в процессе управления объектом СУ. Для согласования обобщённой энтропии покрытия с метрическим информационным пространством берётся модуль её комплексного значения. Модуль обобщённой энтропии покрытия отражает степень несоответствия ресурсов элемента нормативным значениям.

1. Исходящие и входящие информационные потоки элементов системы управления

В процессе взаимодействия происходит обмен ресурсами между элементами СУ и объектом управления. При ресурсном обмене изменение обобщённой энтропии покрытия элемента СУ отражает его информационное участие во взаимодействии элементов. Изменение энтропии покрытия объек-

та управления характеризует степень его отработанности на рассматриваемом промежутке времени. Эффективность системы оценивается по количеству информации объекта управления. Эта величина определяется как разность априорной и апостериорной энтропии покрытия [2].

Участие элементов СУ описывается исходящими и входящими информационными потоками.

$$I^o_{n\ i/j} = H^o_{n\ i/j}(t_1) - H^o_{n\ i/j}(t_0) = -I^o_{n\ j/i}(\Delta t), \quad (1)$$

где $\Delta t = t_1 - t_0$ время информационного обмена.

Информационное участие элемента СУ на данном этапе жизненного цикла определяется его информационным взаимодействием со всеми связанными с ним элементами СУ и объектом управления

$$I^o_{n\ i}(\Delta t) = \sum_{j=0}^m I^o_{n\ i/j}(\Delta t) = \sum_{j=0}^m (H^o_{n\ i/j}(t_1) - H^o_{n\ i/j}(t_0)), \quad (2)$$

где m – количество элементов, участвующих в информационном обмене с i -м элементом.

В выражении (2) присутствует слагаемое $I^o_{n\ i/i}$, которое характеризует затраты i -го элемента на самообеспечение.

2. Динамика информационных потоков в элементе

Рассмотрим информационные потоки в непрерывном времени. Для этого представим СУ в виде совокупности сосредоточенных объёмов, узлов, представляющим собой элементы СУ, и связей между ними, по которым осуществляется информационный обмен. Тогда на основании (1) поток от узла i к узлу j представляет собой производную

$$I^o_{n\ i/j}(t) = d H^o_{n\ i/j}(t) / dt = -I^o_{n\ j/i}(t), \quad (3)$$

В этом случае расхождение информационного поля в узле i [4]

$$\operatorname{div} I_i = \frac{dH_{ni\,re}^o}{dt} - \frac{dH_{ni\,im}^o}{dt} , \quad (4)$$

где $H_{ni\,re}^o$ – действительная часть обобщённой энтропии покрытия,
 $H_{ni\,im}^o$ – мнимая часть обобщённой энтропии покрытия.

Расхождение информационного поля характеризует генераторные или потребительские свойства элемента i . Если $\operatorname{div} I_i > 0$, то этот элемент является источником в информационном обмене, то есть генератором. Если $\operatorname{div} I_i < 0$, то этот элемент является стоком, потребителем в информационном обмене. В случае, когда $\operatorname{div} I_i = 0$, элемент принимает нейтральное участие в информационном обмене.

Система управления должна стремиться к обеспечению нулевого потенциала ($\operatorname{div} I_i = 0$) для каждого элемента, так как в этом случае обеспечивается соответствие элемента требованиям системы по участию в отработке объекта управления и возможностям собственного нормального функционирования, т.е. это состояние элемента характеризует его как выполнившим текущие задачи в системе управления.

На основании свойства аддитивности для энтропии покрытия и обобщённой энтропии покрытия представим информацию через совокупность условных энтропий покрытия. При этом учтём, что линейные свойства энтропии покрытия при преобразованиях определяют линейный характер уравнений, а также то, что приращение энтропии покрытия связано с имеющимися ресурсами, т.е. это приращение определяется прежней энтропией покрытия

$$H_{ni/j}^o(t + \Delta t) = H_{ni/j}^o(t) + A H_{ni/j}^o(t) \Delta t . \quad (5)$$

Перегруппируем члены и устремим приращение по времени Δt к нулю

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{H_{ni/j}^o(t + \Delta t) - H_{ni/j}^o(t)}{\Delta t} = A H_{ni/j}^o(t). \quad (6)$$

На основании (5) при предельном переходе получаем

$$I_{ni} = \sum_{j=0}^m \frac{dH_{ni/j}^o}{dt} = A H_{ni/j}^o \quad (7)$$

Тогда общим решением этого уравнения будет

$$L_i(a) = a_0 + \exp \left[a_1 \sum_{j=1}^m H_{ni/j}^o \right], \quad (8)$$

где a_0, a_1 – некоторые константы.

Для комплексного вида обобщённой энтропии покрытия имеем совокупность гармонических решений с гармоническими функциями степени m

$$L_i(a) = a_0 + \prod_{j=1}^m \exp [a_1 |H_{ni/j}|] \times \\ \times [(\cos \arg H_{ni/j} + i \sin \arg H_{ni/j})], \quad (9)$$

где $\arg H_{ni/j}$ – аргумент комплексной величины.

Таким образом, решением является сложная гармоническая функция с квазипериодическими решениями. Такие решения образуют системы с неравновесным порядком.

Физическим смыслом решения (9) является текущая информация покрытия для элемента СУ, которая, в соответствии с решаемыми ресурсными задачами, может принимать и отрицательные значения.

Иначе решения (8), (9) можно представить в виде

$$L(a, t) = a_0 + \exp [a_1 |H_n(t)|] \exp [i a_1 \arg(H_n(t))]. \quad (10)$$

Тогда при $a_1 < 0, \arg(H_n(t)) > 0$ и при $a_1 < 0, \arg(H_n(t)) < 0$ решение имеет устойчивый фокус [4]. Необходимо отметить, что точка устойчивого фокуса, равная нулю, характеризует стабильное функционирование элемента СУ.

Для случая $a_1 > 0, \arg(H_n(t)) > 0$ и при $a_1 > 0, \arg(H_n(t)) < 0$ решение для элемента СУ является неустойчивым. Реально это приводит или к необоснованному потреблению ресурсов, или уничтожению имеющегося необходимого запаса, что определяется соотношением действительной и мнимой частей значения обобщённой энтропии покрытия.

Система управления вырабатывает управляющие воздействия для текущей коррекции информационных потоков. Решение задачи оптимального управления проводится в соответствии с поставленным целевым функционалом и уравнениями ограничений для объекта управления [1, 3].

В выражении (10) вещественная часть определяет характер изменений информационного потока с учётом совокупности информационных отношений элемента СУ с другими элементами. На участках устойчивого функционирования элемента энтропия покрытия имеет колебательный характер с ограниченной амплитудой. Из (10) следует, что вещественная часть, характеризующая избыток ресурса, равна

$$Re L_i(a) = a_0 + \prod_{j=1}^m \exp [a_j |H_{nij}|] \cos \arg H_{nij}. \quad (11)$$

В соответствие с этим выражением энтропия покрытия элемента представляет собой квазигармонический процесс, образованный совокупностью из m гармоник. Стремление этой величины к нулю определяет оптимальное распределение ресурсов в системе. И наоборот, возрастание этой величины говорит о неоптимальном распределении ресурсов.

Мнимая часть характеризует степень недостаточности ресурсов по отношению к нормативному значению. Резкое возрастание этой величины может привести к выключению элемента из системы управления, что, в свою очередь, может привести к общей катастрофе функционирования системы и к невыполнению поставленной задачи по отработке сложного технического комплекса.

На основании выражения (10) мнимая часть имеет значение

$$Im L_i(a) = a_0 + \prod_{j=1}^m \exp [a_j |H_{nij}|] \sin \arg H_{nij}. \quad (12)$$

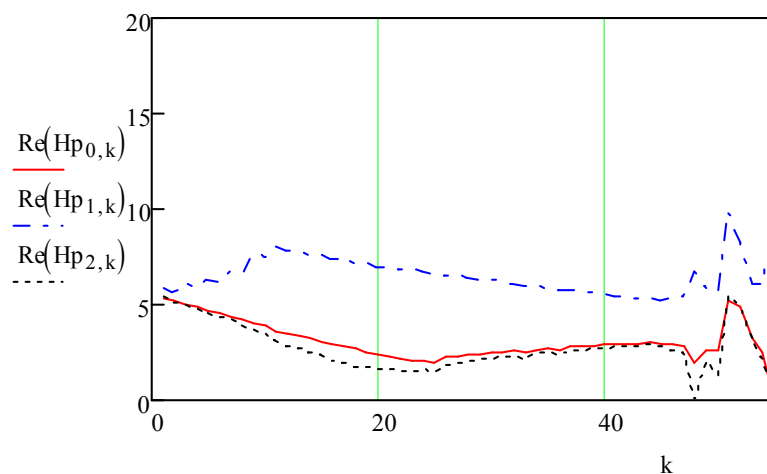
Характер динамики мнимой части энтропии покрытия аналогичен виду графиков для действительной части.

3. Имитационная модель информационной системы

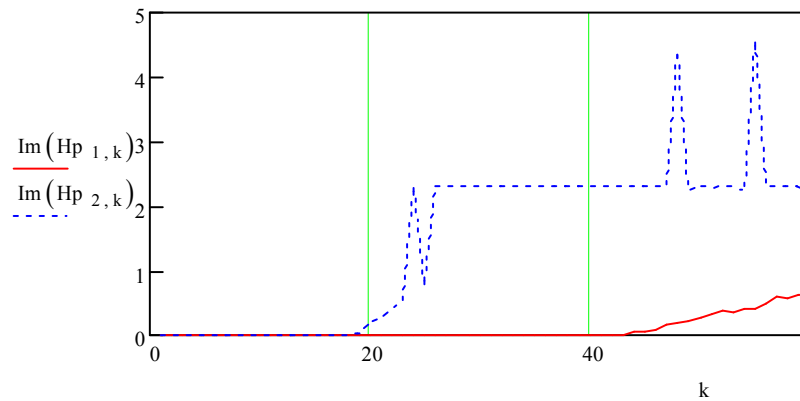
Реализован так называемый каркас имитационной модели, который позволил получить необходимые экспериментальные подтверждения теоретическим результатам. В случае реального применения предлагаемого теоретического подхода ожидается существенная экономия расхода имеющихся в системе ресурсов, обусловленная применением принципов оптимального управления, поскольку известно [1], что любая траектория движения системы, не удовлетворяющая минимуму целевого функционала, приводит к увеличению его значения и, соответственно, к увеличению текущих значений энтропии покрытия, а значит, к нерациональному расходованию ресурсов.

В качестве примера, демонстрирующего возможности предлагаемого информационного подхода, рассмотрим поведение информационной системы с двухкомпонентным вектором состояния СТК. На рис. 1 представлены результаты моделирования работы такой системы, состоящей из трёх элементов – объекта управления (с номером 0) и субъектов (с номерами 1 и 2) [2, 3]. На верхнем рисунке приведено изменение действительной составляющей энтропии покрытия, а на нижнем – мнимой.

Необходимо напомнить, что для объекта управления в данной модели применена энтропия покрытия, которая не может иметь мнимую составляющую. А для субъектов – обобщённая энтропия покрытия с действительной и мнимой составляющими.



а)



б)

Рис. 1. Динамика энтропии покрытия элементов от количества шагов эксперимента: а) динамика действительной составляющей; б) динамика мнимой составляющей.

В состав векторов ресурсов системы вошли обобщённый технический ресурс, социальный ресурс. При этом возможно задание как состояния сотрудничества всех элементов системы, так и информационного противоборства, что обеспечивается настройкой модели путём задания соответствующих коэффициентов в уравнениях состояния, а оптимальное поведение определяется решением целевого функционала.

На рис. 1а видно, что энтропия покрытия объекта управления H_{p0} достигает нулевого значения за 60 итерационных шагов. Это характеризует выполнение задачи управления. При этом достигает нулевого значения ЭП второго участника H_{p2} , характеризующая полное израсходование имеющихся ресурсов. Первый участник за счёт определения ему возможности самостоятельного восстановления ресурсов сохраняет способности к продолжению процесса функционирования СУ ($H_{p1} > 0$) и, в том числе, по восстановлению ресурсов второго участника.

На рис. 1б видно, что примерно с 20 шага итерации мнимая составляющая ЭП второго участника значительно возрастает, что характеризует его работу в условиях нехватки отдельных компонентов вектора ресурсов, то же происходит с первым участником после 40 шага итерации.

Значения ЭП в конце работы СУ и состояния элементов СУ:

1) энтропия покрытия объекта управления $H_{p_0} = 0$ – задача управления выполнена полностью;

2) обобщённая энтропия покрытия первого участника:

- действительная часть $\text{Re}(H_{p_1}) > 0$ – отдельные компоненты вектора состояния превышают нормативные значения, не все ресурсы исчерпаны;

- мнимая часть $\text{Im}(H_{p_1}) > 0$ – отдельные компоненты вектора состояния ниже нормативных значений, недостаток отдельных компонентов вектора ресурсов;

3) обобщённая энтропия покрытия второго участника:

- действительная часть $\text{Re}(H_{p_1}) = 0$ – все компоненты вектора состояния не выше нормативных значений, все ресурсы исчерпаны;

- мнимая часть $\text{Im}(H_{p_1}) > 0$ – отдельные компоненты вектора состояния ниже нормативных значений, явный недостаток отдельных компонентов вектора ресурсов.

Важно, что на этих рисунках показана возможность решению главной задачи системы – достижения энтропии покрытия объекта нулевого значения и выработаны соответствующие управляющие воздействия в информационном пространстве, приводящие к достижению требуемого эффекта.

На рис. 2, 3 проиллюстрирована динамика энтропии покрытия и на рис. 4, 5 информации покрытия (ИП) для субъектов ИС (с номерами 1 и 2).

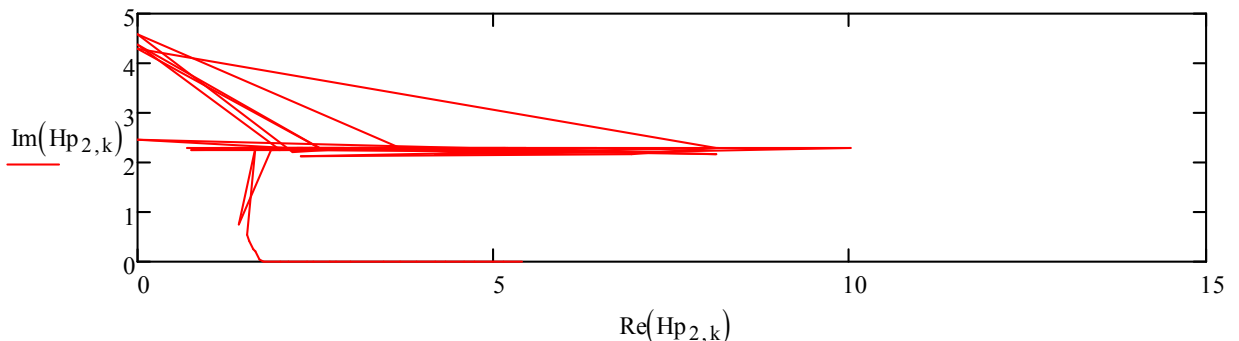


Рис. 2. Динамика обобщённой энтропии покрытия второго участника

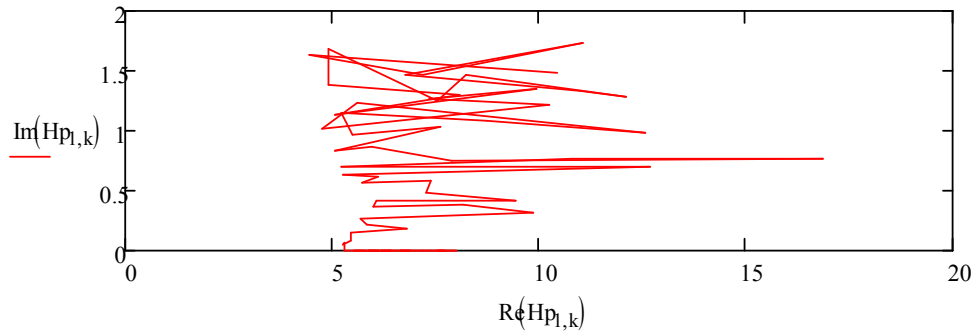


Рис. 3. Динамика обобщённой энтропии покрытия первого участника

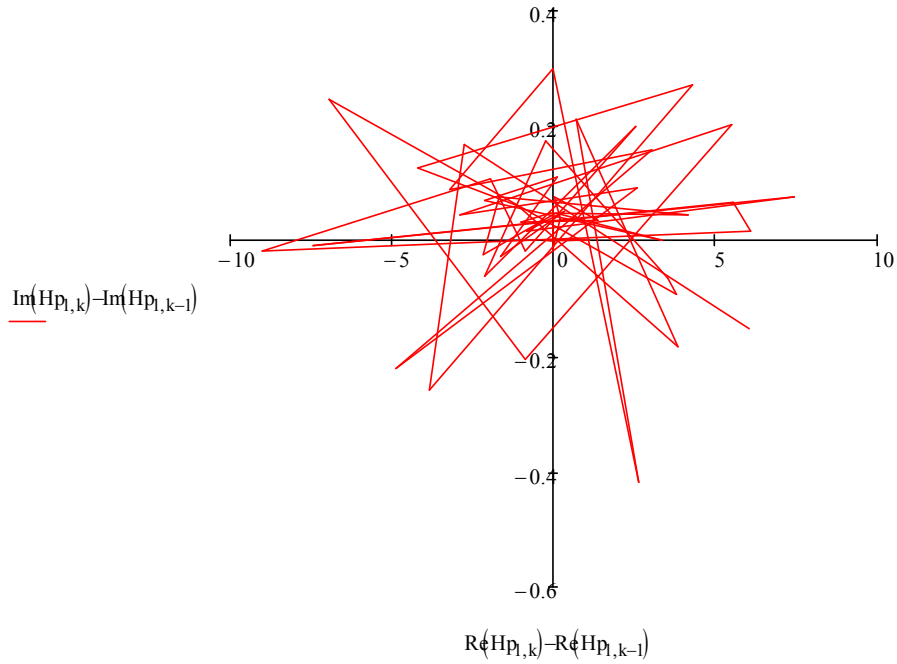


Рис. 4 Динамика обобщённой информации покрытия первого участника

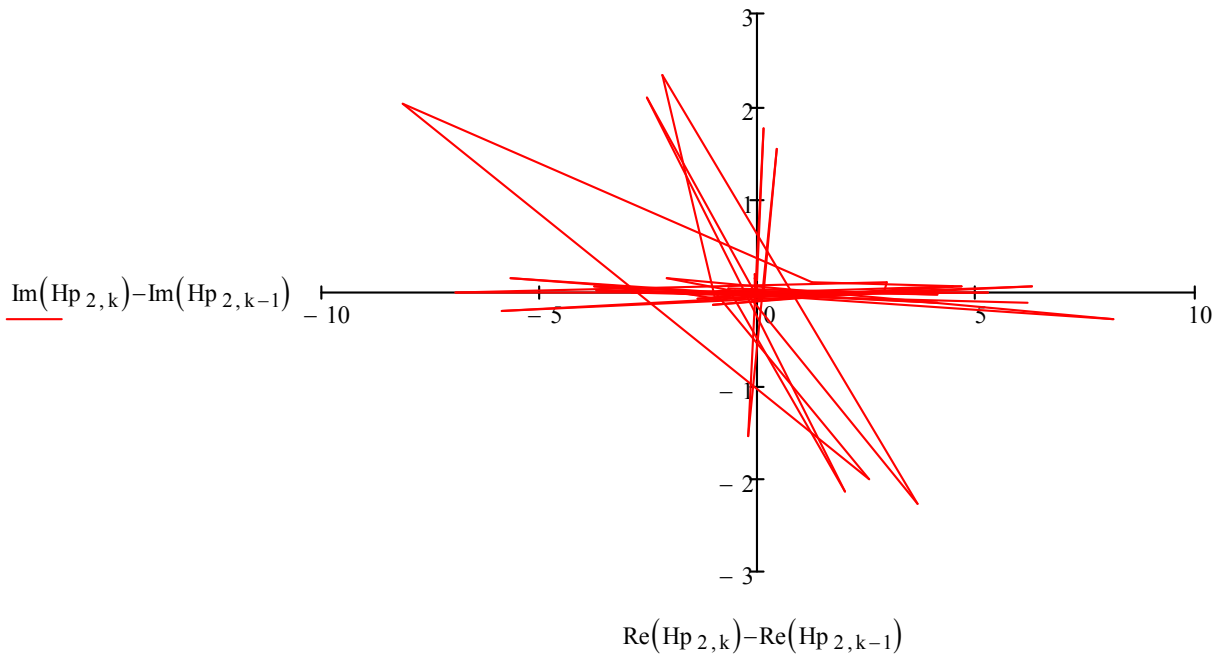


Рис. 5. Динамика обобщённой информации покрытия второго участника

Фазовые портреты на рис. 2, 3 поясняют работу и настройку имитационной модели, процессы ресурсного управления. На рис. 2 видно, что второй участник работает в условиях средней недостаточности ресурсов $Im(Hp_2) \approx 2,5$ бит, а по рис. 3 видно, что первый участник работает в условиях среднего превышения нормативных значений ресурсов $Im(Hp_1) \approx 7,5$ бит.

На рис. 3, 4 указывается разброс значений информационных состояний участников. Информационное состояние первого участника достаточно регулярно распределено по комплексной плоскости, действительные значения информационных состояний лежат в пределах от -9 до 7,5 бит, мнимые значения значительно меньше и лежат в пределах от -0,4 до 0,3 бит. Такой информационный фазовый портрет характеризует достаточно стабильную работу первого участника.

Информационный фазовый портрет второго участника имеет сравнимый по величине значений разброс информационных состояний по действительной и мнимой координатам, следовательно, он характеризует сравнимый по недостатку и пополнению ресурсов режим работы.

По рис. 3, 4 можно сделать вывод, что средние значения предельных множеств на информационных фазовых портретах близки к нулевым значениям, что характеризует эффективную работу системы управления в целом. В противном случае центры фазовых портретов имели бы явное смещение от нулевого значения.

Этот экспериментальный результат соответствует выводам, приведённым выше при анализе выражения (10) и подтверждает устойчивость функционирования системы управления.

Результаты моделирования получены с использованием программного продукта Mathcad-14.

Таким образом, в информационном пространстве, основанном на энтропии покрытия, представлена динамика информационного ресурса элементов СУ СТК и на основе этого определены информационные потоки, отражающие целевое функционирование системы управления. Проведён анализ

входящих и исходящих потоков в узлах системы и получены основные признаки, определяющие устойчивую работу системы или наоборот, приводящие к катастрофам.

Информационное пространство позволило отразить информационный ресурс элементов системы с учётом ее целевого функционирования в целом и отдельного функционирования каждого элемента. Была проведена оптимизация информационного ресурса для информационной системы управления в среде программирования Mathcad-14.

В заключение следует ещё раз отметить, что обобщённая энтропия покрытия может принимать значения только в I квадранте комплексной плоскости, и характер её изменения показан на графиках динамики ЭП. А обобщённая информация покрытия, как разностная величина между соседними во времени состояниями элемента, уже принимает значения на всей комплексной плоскости. Но при этой необычности обобщённая энтропия покрытия позволяет решать сложные задачи управления в понтрягинской форме.

Литература

1. Сухов А.В. Динамика информационных потоков в системе управления сложным техническим комплексом // Теория и системы управления, 2000. – № 6.
2. Сухов А.В. Методы и технологии выработки управленческих решений. – М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 2003.
3. Сухов А.В., Гатилов М.А., Зайцев М.А. Оптимальное управление техническим состоянием производственных объектов в информационном пространстве с использованием энтропии покрытия // Компрессорная техника и пневматика, 2010. – № 5.
4. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987.