



И
Ф
В
Э
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 96-33
ОЛУ

А.А.Боровиков, Г.Н.Хромова

МОДЕЛИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОТОВНОСТИ
СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
К ЭФФЕКТИВНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

Протвино 1996

Аннотация

Боровиков А.А., Хромова Г.Н. Модели для определения показателей готовности современной технической установки к эффективному использованию: Препринт ИФВЭ 96-33. – Протвино, 1996. – 17 с., 4 рис., библиогр.: 17.

Рассматриваются нетрадиционные понятия и модели для формального описания работы технической установки и взаимодействия с ней. Предложены критерии для оценивания готовности установки к эффективному и безаварийному использованию. Обсуждаются условия применимости моделей на практике.

Abstract

Borovikov A.A., Khromova G.N. Models for determining indications of readiness of a present-day engineering installation for its effective exploitation: IHEP Preprint 96-33. – Protvino, 1996. – p. 17, figs. 4, refs.: 17.

Some unconventional concepts and models to describe formally the operation of an engineering installation and ways of interactions with it are considered. The criteria for estimating readiness of the installation for its effective and no-failure operation are suggested. The conditions of practical applicability of the models are discussed.

1. Введение

Одной из проблем, с которой сталкиваются создатели уникальных технических установок при использовании их в решении практических задач [1,2], является аттестация этих сооружений. Общепринятых методик для оценивания готовности подобных объектов к эффективному и безаварийному использованию [3] пока нет. В документах Международной организации по стандартам [4] высказываются замечания о степени применимости общих рекомендаций к специфическим установкам, поэтому задача поиска обобщенных мер оценивания является актуальной [5].

В статье предлагается ряд нетрадиционных понятий и моделей, с помощью которых строится методическая основа для оценивания готовности технической установки к эффективному её использованию. Готовность установки предлагаем оценивать по следующим показателям:

- качество конечного продукта установки;
- эффективность использования в конкретных задачах;
- уровень детерминированности действий оператора при управлении установкой;
- уровень контроля безаварийных условий работы.

Обсуждаются также возможности применения предлагаемых моделей на практике.

2. Опорные понятия и модели

2.1. Понятие конечного продукта и его состояния

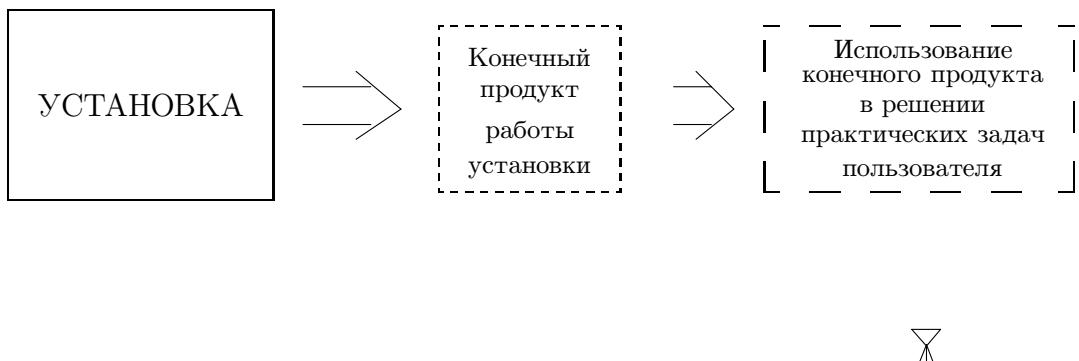
Конечный продукт работы установки (элемента ее структурного разбиения) – это результат выполнения установкой (элементом) своего функционального назначения.

Конечный продукт P работы установки может быть описан множеством его характеристик X : $P = F(\{x_i\})$, $x_i \in X$, где $i = 1, \dots, l$, l – число характеристик P .

Аналогично конечный продукт P' работы элемента установки также описывается множеством характеристик Y : $P' = F(\{y_j\})$, $y_j \in Y$, где $j = 1, \dots, m$; m – число характеристик для P' .

Пользователем установки является человек, использующий конечный продукт установки для решения конкретных задач. На рис.1а показана обобщенная схема использования установки в практических целях, на рис.1б – ее конкретизация для ускорителя заряженных частиц. Для ускорителя конечный продукт P – это пучок ускоренных частиц с определенными характеристиками. В список включаются, например, такие характеристики пучка, как: величина тока $I \equiv x_1$; массовый состав $A \equiv x_2$; фазовый объем $\varepsilon \equiv x_3$; энергия частиц $W \equiv x_4$. Тогда $P = F(I, A, \varepsilon, W)$.

а)



б)

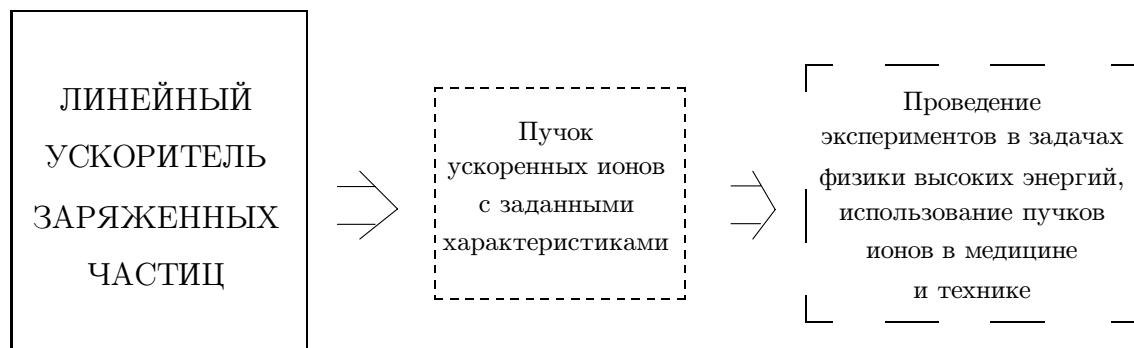


Рис. 1. Схема использования установки: а) общий случай; б) для линейного ускорителя заряженных частиц.

Каждый пользователь, исходя из специфики решаемой задачи, выбирает те характеристики, которые наиболее важны. Он задает границы допустимых значений этих характеристик – множества X_{min} и X_{max} , при которых возможно решение его задачи. Эти границы могут не совпадать с границами, которые установлены

создателями для определения допустимой работы установки – $X_{нач}$ и $X_{кон}$. Поясним на примере. Пучок частиц на выходе ускорителя может присутствовать. Ток пучка I лежит в допустимых пределах ($I_{нач} \leq I \leq I_{кон}$). С точки зрения создателя, установка "работает". Однако величина тока пучка может не устраивать физика-экспериментатора при решении конкретной задачи ($I < I_{min}$). Тогда пользователь будет считать, что установка "не работает".

Применяя традиционные оценки работы установки по показателю "наработка на отказ" [6], получаем различные значения для пользователя и для создателя. Кроме того, и оперативный персонал попадает в затруднительное положение, когда необходимо принимать решение при управлении установкой. Получить объективную оценку работы современной технической установки можно только в том случае, если ввести понятие "три состояния" установки, а не два ("работает – не работает").

Предлагаем состояние установки оценивать по состоянию ее конечного продукта. Модель состояний конечного продукта P установки представим следующим образом:

- состояние $c1$ – конечный продукт отсутствует;
- состояние $c2$ – конечный продукт вырабатывается, но его качество не удовлетворяет требованиям пользователя;
- состояние $c3$ – конечный продукт отвечает требованиям пользователя.

Обозначим текущее состояние конечного продукта как C_p . Условия, отделяющие одно состояние от другого, зададим, например, такими правилами:

$$C_p = \begin{cases} c1, & \text{если } \exists x_i \in X \quad x_i \notin [x_{нач}, x_{кон}]; \\ c2, & \text{если } \forall x_i \in X \quad x_i \in [x_{нач}, x_{кон}], \\ & \text{но } \exists x_i \in X \quad x_i \notin [x_{min}, x_{max}]; \\ c3, & \text{если } \forall x_i \in X \quad x_i \in [x_{min}, x_{max}]. \end{cases} \quad (1)$$

Правила могут меняться в зависимости от решаемой пользователем задачи или от выбранного режима работы установки.

2.2. Модель интегрального и детального состояний установки

Состояние установки, которое будет определяться по состоянию ее конечного продукта, назовем интегральным состоянием.

Интегральное состояние установки определим следующим образом:

$$\left[\begin{array}{ll} \text{если } C_p = c1 & - \text{установке приписываем "нерабочее" } \\ & \text{состояние (состояние C1);} \\ \text{если } C_p = c2 & - \text{установка "функционирует" } \\ & \text{(состояние C2);} \\ \text{если } C_p = c3 & - \text{установка работает "нормально" } \\ & \text{(состояние C3).} \end{array} \right] \quad (2)$$

На рис.2 графически показано, как с помощью модели трех состояний согласуются точки зрения создателя, пользователя и обслуживающего персонала при оценивании работы установки.

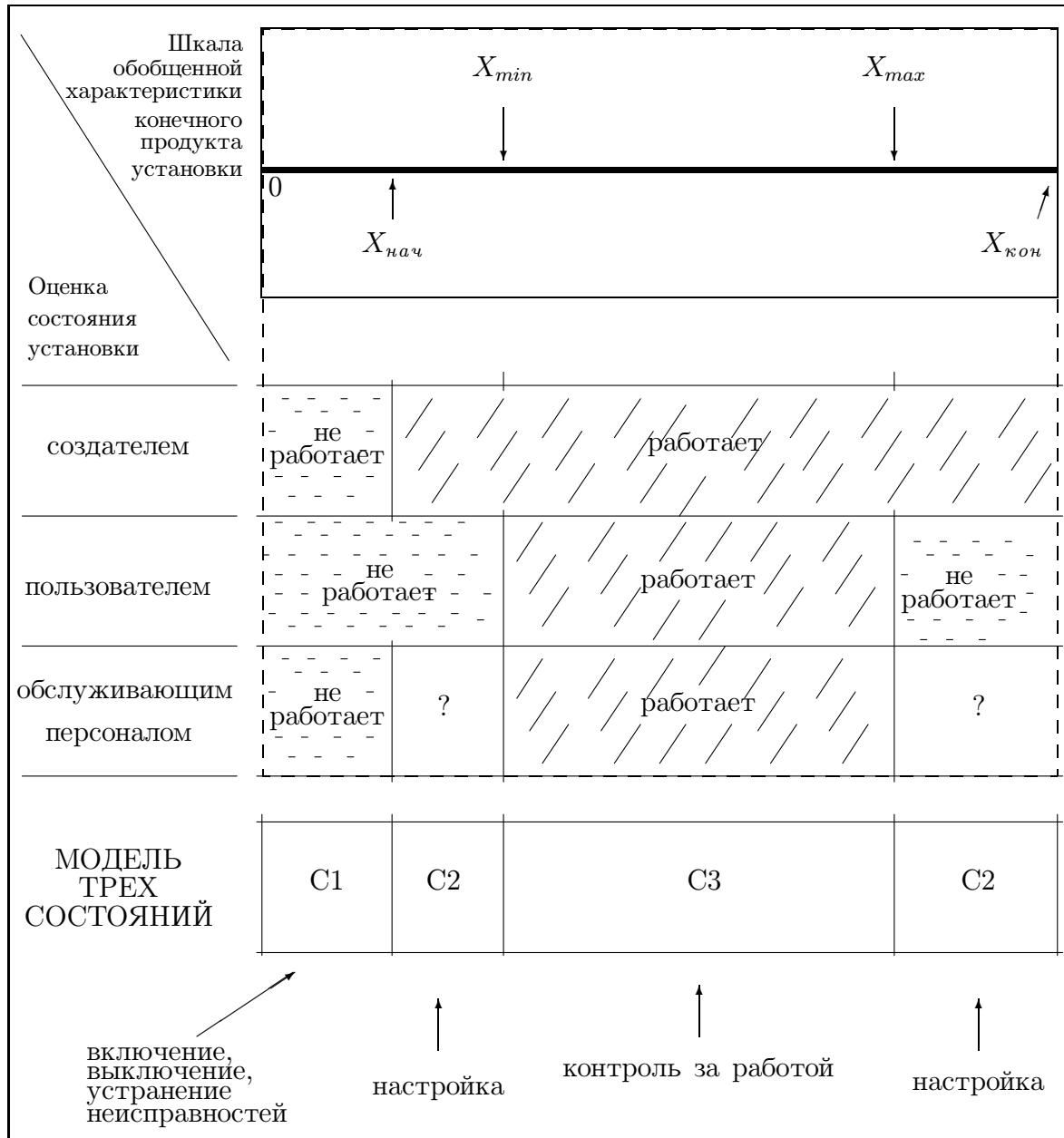


Рис. 2. Три точки зрения на работу установки: создателя ($X_{нач}, X_{кон}$); пользователя (X_{min}, X_{max}); обслуживающего персонала, принимающего решения при управлении установкой.

Работа установки обеспечивается взаимодействием элементов ее структурного разбиения. Каждому элементу в соответствии с технологическим процессом отво-

дится определенная функциональная роль. Результат выполнения этой роли является конечным продуктом P' работы элемента. В общем случае на характеристики Y конечного продукта P' накладываются два типа ограничений. Первые ограничения диктуются условиями функционирования установки как единого объекта. Работа каждого элемента должна обеспечивать получение на выходе установки конечного продукта P и не должна создавать аварийных условий для работы зависимых от него элементов. Такие ограничения определяются создателями установки с учетом выбранного режима работы. Назовем эти условия технологическими. Границы технологических условий задаются множествами Y_{min}^t и Y_{max}^t .

Второй тип ограничений связан с условиями, которые позволяют в заданном режиме поддерживать $C_p = c3$. Назовем их условиями, зависимыми от требований пользователя к конечному продукту. Границы этих условий задаются множествами Y_{min} и Y_{max} . Очевидно, что все ограничения должны быть связаны соотношением

$$Y_{min}^t \leq Y_{min} < Y_{max} \leq Y_{max}^t.$$

Конечному продукту P' элемента структурного разбиения установки также можно присвоить одно из трех состояний множества $\{c1, c2, c3\}$. Обозначим текущее состояние конечного продукта элемента как $C_{p'}$. Тогда правила для определения $C_{p'}$ запишем следующим образом:

$$C_{p'} = \begin{cases} c1, & \text{если } \exists y_j \in Y \quad y_j \notin [y_j^{min}, y_j^{max}]; \\ c2, & \text{если } \forall y_j \in Y \quad y_j \in [y_j^{min}, y_j^{max}], \\ & \text{но } \exists y_j \in Y \quad y_j \notin [y_j^{min}, y_j^{max}]; \\ c3, & \text{если } \forall y_j \in Y \quad y_j \in [y_j^{min}, y_j^{max}]. \end{cases} \quad (3)$$

Определив состояние конечного продукта P' , будем оценивать состояние элемента по состоянию этого конечного продукта:

$$\begin{cases} \text{если } C_{p'} = c1, & \text{то состояние элемента считаем} \\ & \text{"не рабочим" (состояние C1);} \\ \text{если } C_{p'} = c2, & \text{считаем, что элемент} \\ & \text{"функционирует" (состояние C2);} \\ \text{если } C_{p'} = c3, & \text{считаем, что элемент "нормально" } \\ & \text{работает (состояние C3).} \end{cases} \quad (4)$$

Элемент находится в состоянии $C1$, когда выполняются процедуры включения или выключения установки, или когда в процессе работы появляется неисправность данного элемента. Элемент находится в состоянии $C2$, если он еще не настроен на заданный режим после включения или если возникла его расстройка при работе на пользователя.

Состояние установки, выраженное через состояния элементов ее структурного разбиения назовем детальным состоянием установки.

Поскольку каждый элемент установки находится в одном из трех состояний, составляющих множество $\{C1, C2, C3\}$, то детальное состояние установки представим набором таких множеств. Построим матрицу состояний S [7], имеющую

размерность $n \times r$, где n – число элементов структурного разбиения установки, r – число возможных состояний ($r = 3$). Значение элемента s_{ij} ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, 2, 3$) матрицы S определим по правилу

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-элемент находится в } j\text{-состоянии;} \\ 0, & \text{в ином случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Когда установка выключена, матрица S имеет вид

$$S = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

а в режиме нормальной работы (конечный продукт P находится в состоянии $c3$, $C_p = c3$) ее вид

$$S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Все иные заполнения матрицы отражают промежуточные состояния установки.

На рис.3 показана упрощенная схема линейного ускорителя протонов для первого уровня его структурного разбиения. Работа ускорителя обеспечивается взаимодействием основных элементов: 1) системы инжекции; 2) канала согласования; 3) системы ускоряющих структур; 4) системы высоковольтного высокочастотного питания; 5) технологических систем, поддерживающих работу всех элементов. Конечный продукт (пучок ускоренных частиц) зависит от состояния конечных продуктов каждого из пяти элементов. Детальное состояние первого уровня структурного разбиения ускорителя представляется матрицей S размерностью 5×3 . В таблице 1 указаны функциональные назначения и соответствующие конечные продукты для элементов 2-4.

2.3. Наблюдаемость работы установки

Будем считать установку наблюдаемой, если имеется возможность однозначно определять ее детальное состояние в любом режиме работы

На рис.4 на примере одного элемента установки показана взаимосвязь между вводимыми понятиями. Работа каждого элемента поддерживает конкретный технологический процесс. Поведение процесса определяется множеством технологических параметров $Z = \{z_k\}$, где k – число существенных параметров данного процесса.

Выделим три способа определения состояния элемента $C_{p'}$. Первый состоит из прямого измерения характеристик P' и оценивания их по правилам (3). Эта оценка является наиболее достоверной. Второй способ связан с определением состояния

элемента по значениям его технологических параметров. Такое определение $C_{p'}$ является косвенным. Достоверность результатов, полученных вторым способом, зависит от того, существуют ли взаимно однозначные связи $\{y_j\} \leftrightarrow \{z_k\}$.

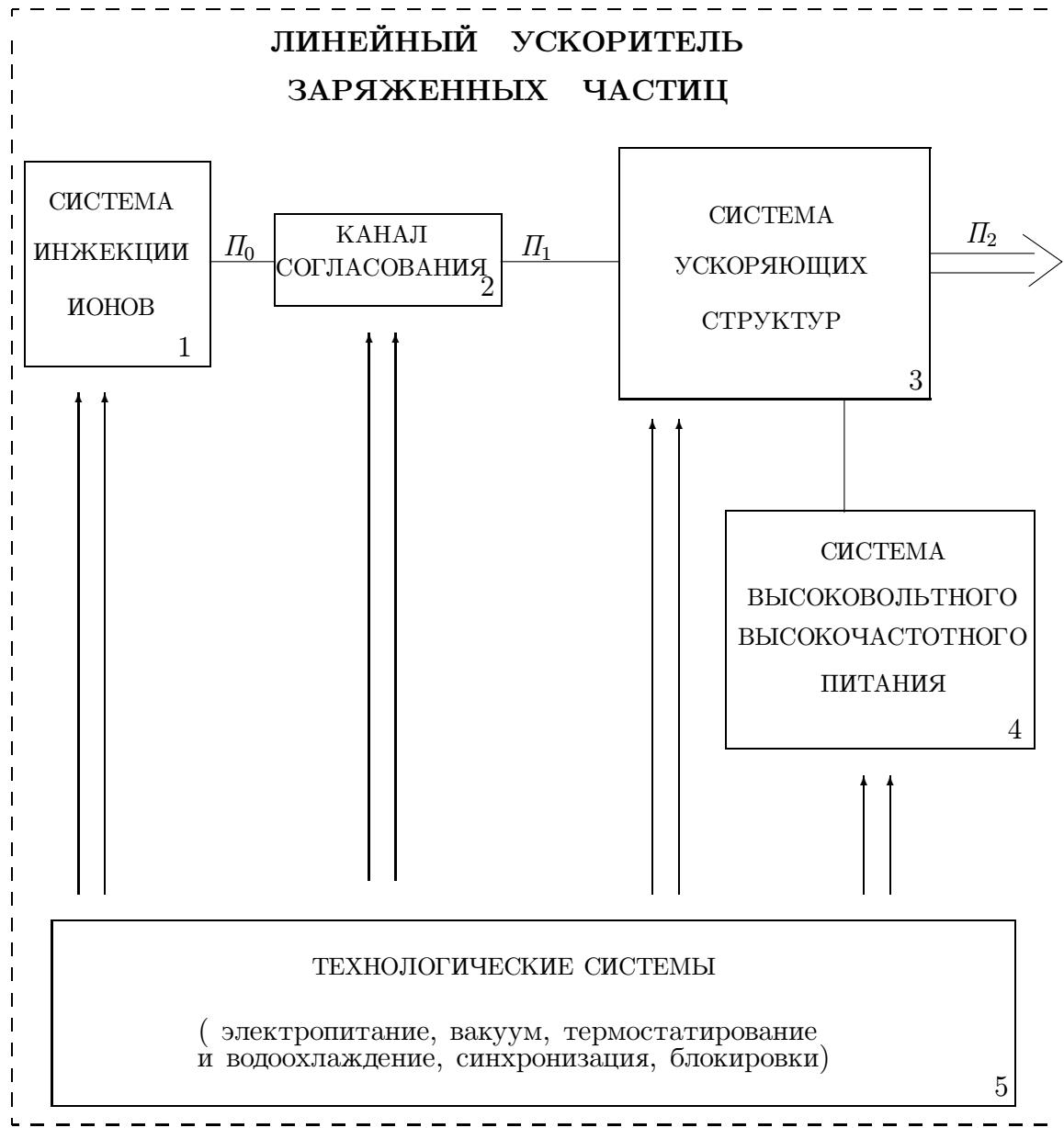


Рис. 3. Упрощенная схема линейного ускорителя для первого уровня структурного разбиения: P_0, P_1, P_2 – пучок заряженных частиц в трех точках установки; P_2 – конечный продукт работы установки.

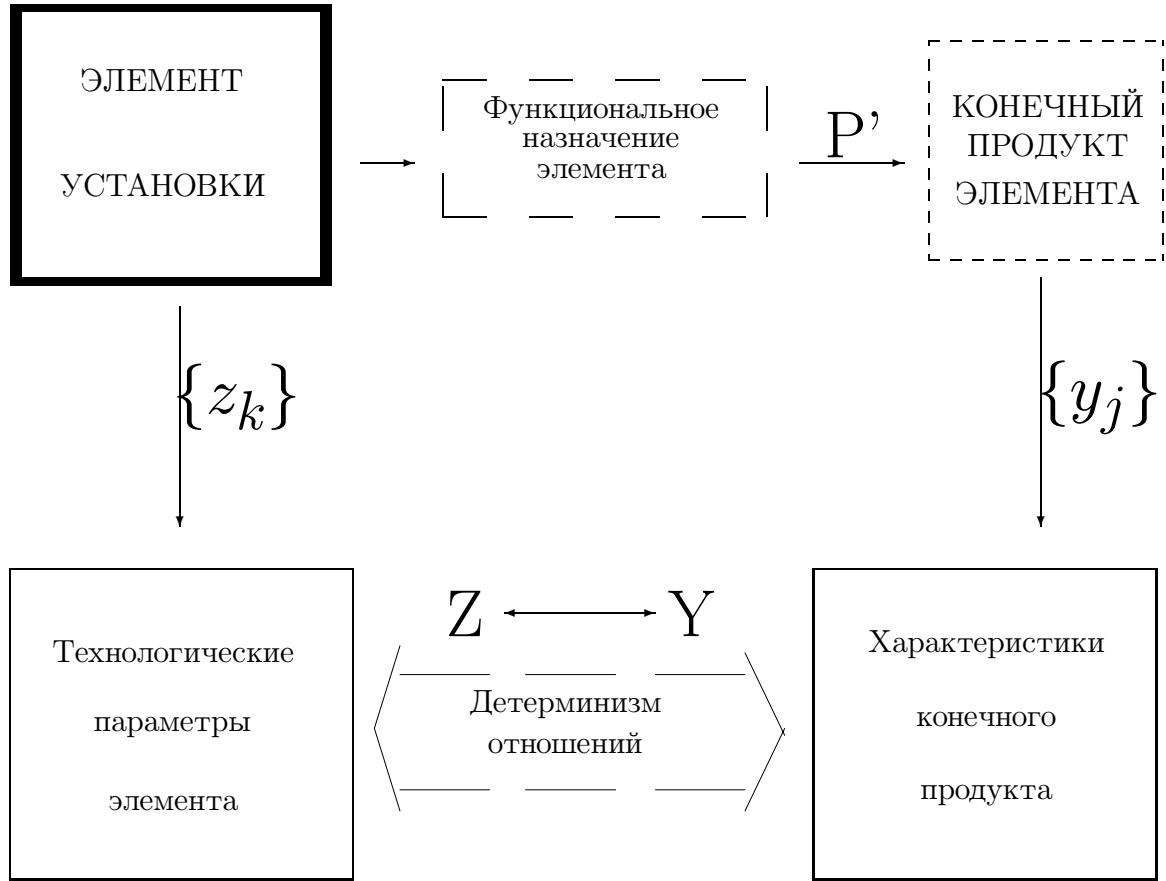


Рис. 4. Схема взаимосвязей между понятиями, описывающими работу элементов структурного разбиения установки.

Взаимосвязи выявляются создателями установки на стадии стендовых испытаний. Если такие связи существуют, то ограничения для Y заменяются ограничениями для Z для тех характеристик P' , которые предполагается оценивать вторым способом. В правилах (3) часть значений из множеств $Y_{min}^t, Y_{min}, Y_{max}, Y_{max}^t$ заменяется значениями из множеств $Z_{min}^t, Z_{min}, Z_{max}, Z_{max}^t$. Для примера в таблице 2 приведены технологические параметры Z и характеристики Y конечного продукта P' для одного из элементов линейного ускорителя (рис.3 , элемент 1) и возможные способы оценивания $C_{p'}$ в процессе работы установки.

Детерминизм работы элемента – это свойство элемента производить конечный продукт с одними и теми же характеристиками (в пределах допустимых погрешностей) при одних и тех же значениях его технологических параметров.

Третий способ, возможно, самый сложный, – это оценивание состояния P' по результатам взаимодействия элементов. Например, для канала согласования (рис.3, элемент 2) такую характеристику, как меру согласованности фазового объема пучка частиц (см. таблицу 1) со входом в ускоряющие структуры (элемент 3), определяют по величине токопрохождения κ ($\kappa = I_2/I_1$) при условиях нормальной работы

элементов 3-5. Так, по результату взаимодействия элементов 2-4 оценивается одна из характеристик конечного продукта элемента 2.

Определение условий для построения правил (1), (3) может потребовать проведения специальных экспериментов [11], чтобы установить параметры взаимосвязей между элементами в окрестностях рабочей точки заданного режима.

2.4. Модель процесса управления установкой в режиме ее использования

Управление установкой в режиме ее использования – это выполнение процедур включения, настройки, выключения установки и восстановление нормальных технологических условий работы при возникновении неисправностей.

Процессы включения, настройки и выключения установки представляются как процессы включения, настройки и выключения совокупности элементов ее структурного разбиения. Введенные понятия позволяют говорить о модели процесса управления, как о выполнении двух процедур: 1) определения текущего детального состояния установки; 2) выполнения последовательности шагов по переводу установки из текущего состояния в заданное. Под управляемостью установки будем понимать возможность перевода ее элементов из одного состояния в другое за определенное время.

Формализация процесса управления установкой при ее использовании – это представление процедур управления набором формальных правил, дающих возможность оперативному персоналу включать, настраивать, выключать установку и восстанавливать условия безаварийной работы элементов, не вдаваясь в физику протекающих в них процессов.

3. Оценивание качества и эффективности работы установки

3.1. Паспортизация

Первостепенной целью при использовании установки является получение конечного продукта. Знание характеристик конечного продукта необходимо для ответа на вопрос [5]: соответствует ли качество конечного продукта требованиям пользователя при решении его задач. Паспортизация заключается в измерении и статистическом оценивании характеристик конечного продукта: $\langle X \rangle = \{ \langle x_i \rangle, \sigma_{x_i} \}$.

Условия паспортизации:

1. Паспортизация проводится для каждого режима установки, в котором предполагают ее использовать.
2. Если установка после запуска и выведения в заданную рабочую точку работает в автоматическом режиме (например, линейный ускоритель протонов), то во время проведения измерений вмешательство оператора в работу элементов недопустимо.
3. Длительность периода наблюдений выбирается такой, чтобы обеспечить достоверность статистических оценок характеристик конечного продукта.

4. Фильтрация измеренных данных для улучшения показателей качества исключена.

В состав технических средств для измерения характеристик конечного продукта входят первичные преобразователи сигналов (датчики), вторичные преобразователи (измерительные каналы) и средства сбора и накопления данных (ЭВМ). Для специализированных технических объектов не всегда имеются стандартные первичные преобразователи для восприятия характеристик конечного продукта, поэтому создание необходимых датчиков – проблема особого внимания разработчиков.

Уровень развития электронной промышленности позволяет комплектовать измерительные системы в основном из стандартных модулей. Если необходимо учитывать конкретную специфику в измерении каких-то определенных параметров, то предусматриваются собственные разработки для построения измерительных каналов. Выполнение паспортизации предусматривает наличие методик и программ для проведения калибровок первичных преобразователей и измерительных каналов, процедур измерения, сбора и хранения данных, моделей для обработки (преобразование к физическим величинам, вычисление статистических характеристик).

Технические объекты, о которых идет речь, как правило, являются сложными динамическими установками. Функциональной особенностью некоторых из них, например, ускорителей заряженных частиц, является то, что конечный продукт реально существует лишь в процессе работы установки. Поэтому контроль за характеристиками конечного продукта установки необходимо вести постоянно или с заданной периодичностью в зависимости от стабильности работы технических элементов, например, как показано в [12].

3.2. Определение показателей эффективности использования

Как говорилось ранее, каждый пользователь, исходя из специфики решаемой задачи, предъявляет свои требования к качеству конечного продукта работы установки. Пользователя интересует реальное время, в течение которого производится конечный продукт с необходимыми ему характеристиками. Если пользователь предъявляет более жесткие требования, чем указано в паспортных данных, то есть $X_{\text{нач}} < X_{\min}$ или $X_{\text{кон}} > X_{\max}$, он хотел бы реально оценивать и ту эффективность работы, которую установка обеспечивает при решении его задачи.

Введенная модель (см. рис.2) позволяет оценивать эффективность работы на задачах пользователя. Для этого необходим учет времени [13] пребывания установки в каждом из состояний. Если установка находится в состоянии C_1 , то T_1 – время, в течение которого установка не работает на конечный результат. T_1 складывается из времени включения элементов и систем установки, выводе их на режим, при котором на выходе появляется конечный продукт, и времени выполнения восстановительных работ при обнаружении неисправностей технических элементов. Если установка находится в состоянии C_2 , то T_2 – время пребывания в состоянии C_2 . T_2 включает в себя время настройки систем на заданный режим после включения и запуска и время устранения нестабильностей, возникающих в процессе работы.

Установка работает "нормально", когда находится в состоянии C_3 . T_3 – время работы в заданном режиме.

Числовой показатель для оценивания эффективности использования установки в различных задачах – коэффициент эффективного использования (КЭИ) [13] – определяется по формуле

$$\text{КЭИ} = T_3 / (T_1 + T_2 + T_3).$$

Традиционный подсчет простоев в работе установки можно учитывать с помощью коэффициента простоев (КПР)

$$\text{КПР} = T_1 / (T_1 + T_2 + T_3).$$

КПР характеризует надежность работы, а КЭИ – ее эффективность в конкретном режиме. КПР может заменить КЭИ только в тех случаях, когда требования пользователя совпадают с паспортными характеристиками.

Учитывая относительность границ между C_2 и C_3 , следует говорить и об относительности показателя КЭИ. Применение методики оценивания КЭИ еще на стадии подготовки к эксплуатации позволит составить карту эффективности работы установки в различных режимах. С ее помощью каждый пользователь конечного продукта может планировать длительность проведения своих работ в конкретном режиме функционирования установки. Для специфических установок карту с характеристиками режимов желательно прилагать к паспорту.

4. Уровень детерминированности действий оператора

Управление сложными установками предусматривает участие человека. Поэтому эффективное и безаварийное использование установок во многом зависит от того, существуют ли модели, позволяющие детерминировать действия оперативного персонала в процессе управления, а при наличии таких моделей – насколько обеспечены условия их использования в реальной работе.

Создавая установку, разработчики изучают сложные переходные явления и исследуют процессы взаимодействия многих элементов. При этом, как правило, широко применяются традиционные модели состояний в пространстве параметров. Использование установки в решении практических задач смешает акценты с исследовательских целей на эксплуатационные.

Оставаясь в рамках традиционных представлений о состоянии установки, сложно формализовать процедуры включения, настройки, выключения и поиска неисправностей. Поэтому работа оператора часто превращается в инженерное искусство. Дублирование таких сложных, потенциально опасных установок должно сопровождаться и дублированием высококвалифицированного обслуживающего персонала, как, например, для эксплуатации атомных станций. Поиск альтернативных подходов к формализации принятия решений в процедурах управления может помочь решить проблему организации обслуживания современных установок.

Если традиционные модели описания состояний установки направлены на изучение динамики протекающих процессов, то предлагаемый подход основан на оценивании состояния установки по выполнению каждым ее элементом своего функционального назначения. Структурное разбиение установки при ее использовании может быть многоуровневым. Оно выполняется до уровня тех элементов, которые необходимы оператору при управлении установкой. Введенные в разд. 2 понятия позволяют представить процесс управления двумя процедурами: процедурой определения текущего детального состояния установки и процедурой выполнения последовательности шагов по включению, настройке и выключению элементов при переводе установки из текущего состояния в заданное.

Вторая процедура, как правило, формализуется на основании инструкций, составленных разработчиками систем установки для обслуживающего персонала. Если известно состояние установки в конкретный момент времени, то инструкция регламентирует действия оператора, указывая, что можно делать, а что нельзя. Для формализации инструкций возможно использовать [13] матрицу состояний S . Инструкция перекладывается на язык последовательных изменений содержимого матрицы S по правилам (1)-(5), а само содержимое визуализируется для оператора.

Детерминировать действия оператора можно только при автоматизации процедуры оценивания текущего состояния установки и ее элементов. Трудно полагаться на то, что оператор сможет отследить информацию на 15-20 экранах дисплеев [14], где отражены десятки меняющихся сигналов. Установлено [15], что внимание человека ограничивается одновременным восприятием 5-7 характеристик. Неполное знание детального состояния установки вносит неопределенность в работу оператора, последствия которой могут быть непредсказуемы. Поэтому непременным условием при организации использования современных установок, учитывая их масштабность и необходимость одновременного контроля многих параметров, считаем автоматизацию первой процедуры.

Если необходимость автоматического сбора и отображения данных о работе современных установок давно не вызывает сомнений [16], то необходимость автоматизации определения текущего состояния пока не получила широкого распространения. Сложность представляет использование в реальном времени имеющихся моделей [17]. Предлагаемые понятия и модели можно привлечь к формализации процедуры определения состояния в режиме реального времени.

Автоматизация процесса определения состояния возможна при выполнении двух условий: обеспечении наблюдаемости детального состояния установки; обеспечении детерминированности работы как отдельных элементов, так и установки в целом. Отсутствие детерминизма в работе элемента указывает на наличие скрытых существенных параметров. Если не для всех элементов имеется возможность определять их состояния, а влияние скрытых параметров приходится компенсировать изменениями известных управляемых, то требуется оценить, насколько это усложняет процесс управления и каким уровнем знаний должен обладать оператор. Предложенные модели дают критерии для определения – все ли сделано для оператора, чтобы он выполнял действия осознанно.

Уровень детерминированности действий оператора предлагаем оценивать по ответам на следующие вопросы: имеются ли элементы, состояния которых ненаблюдаемы, и сколько их; имеются ли существенные параметры, которые не выявлены. Чтобы получить ответы на поставленные вопросы, необходимо иметь ряд методик:

- Методику разбиения установки на элементы, которые используются оперативным персоналом при управлении.
- Методику проведения экспериментов для выявления детерминированности работы установки и элементов ее структурного разбиения.
- Методику определения состояния элементов по показаниям имеющихся датчиков.

5. Уровень контроля безаварийных условий работы установки

Аварийные ситуации возникают по двум причинам: из-за выхода из строя конкретного элемента и неправильных действий персонала при переводе установки из одного состояния в другое. Уровень обеспеченности безаварийного управления можно оценивать по ответам на следующие вопросы: 1) насколько полно сформулированы условия безаварийной работы для установки в целом и для каждого элемента ее структурного разбиения; 2) обеспечен ли контроль их выполнения; 3) имеет ли обслуживающий персонал схемы действий по восстановлению безаварийных технологических условий в случае появления нарушений; 4) есть ли возможность контролировать действия персонала в критических ситуациях.

Работа любой установки построена на взаимодействии элементов ее структурного разбиения. Одна из сторон взаимосвязей заключается в том, что работа одних элементов определяет технологические условия работы других, от них зависимых. Именно этим объясняется последовательность действий при включении, настройке и выключении установки. Таким образом, условия безаварийной работы заложены во взаимодействии элементов. Контролировать выполнение этих условий можно, контролируя состояния элементов.

Для каждого элемента a_i , $i = 1, \dots, n$, где n – число элементов структурного разбиения установки, составим список L_i из тех элементов, которые определяют технологические условия его работы. Назовем эти списки контрольными. Для некоторых элементов списки могут быть пустыми. Условия безаварийной работы установки определим следующим образом.

Технологические условия работы элемента a_i считаем безаварийными, если ни один элемент установки, входящий в его контрольный список L_i , не находится в состоянии $C1$. Состояние установки при работе на пользователя считаем безаварийным, если технологические условия работы каждого элемента установки признаны безаварийными.

Каждому списку L_i поставим в соответствие матрицу состояний, составленную для входящих в список элементов, – матрицу S_{ai} . Контроль выполнения условий

безаварийности работы установки проводим по анализу содержимого матриц состояний $\{ S_{ai} \}$. Уровень контроля безаварийных условий работы установки предлагаем оценивать по выполнению следующих программ при подготовке к использованию:

- составление списков L_i и матриц S_{ai} , $i = 1, \dots, n$;
- создание средств для заполнения и регулярного обновления содержимого матриц S_{ai} ;
- создание средств для анализа содержимого матриц S_{ai} с помощью ЭВМ и/или с помощью визуального контроля оператором.

Общим подходом при устранении нарушений считаем восстановление технологических условий работы каждого элемента. Если оператор не может восстановить функции вышедшего из строя элемента, он должен по заранее предусмотренному сценарию отключить те из них, технологические условия работы которых нарушаются.

Для каждого требуемого перевода установки из одного состояния в другое оператору необходимо подсказывать разрешенные действия. Действия, ошибки в которых могут привести к авариям, желательно выполнять с помощью ЭВМ, чтобы на программном уровне контролировать работу человека.

6. Выводы

Введенные понятия и модели позволяют анализировать достижения создателей с точки зрения подготовки установки к эксплуатации и оценивать, все ли сделано для ее эффективного и безаварийного использования. Можно говорить, что современная техническая установка доведена до промышленного образца, если:

1. Работа каждого элемента и установки в целом детерминирована.
2. Реализованы процедуры автоматического определения текущего интегрального и детального состояний установки.
3. Сформулированы и контролируются технологические условия безаварийной работы элементов.

Таблица 1. Некоторые элементы линейного ускорителя и соответствующие им конечные продукты.

Элемент структурного разбиения	Функциональное назначение	Конечный продукт работы элемента	Основные характеристики конечного продукта
Канал согласования (элемент 2)	Фильтрация пучка частиц по массовому составу и энергии и создание оптимальных условий ввода пучка в систему ускоряющих структур	Функция преобразования $F = \Pi_0 \rightarrow \Pi_1$ 1) фильтрация пучка $f_1: A_0 \rightarrow A_1$ $W_0 \rightarrow W_1$ 2) согласование фазового объема пучка с характеристиками входа ускоряющих структур $f_2: \varepsilon_0 \rightarrow \varepsilon_1$	Однородность частиц пучка Π_1 по энергии W_1 и массовому составу A_1 на входе в систему ускоряющих структур (Π_0 - пучок на входе канала согласования, A_0 - массовый состав пучка Π_0) Мера согласованности фазового объема ε_1 пучка Π_1 со входом системы ускоряющих структур (ε_0 - фазовый объем входного пучка Π_0)
Система ускоряющих структур (элемент 3)	Захват и ускорение пучка частиц до требуемой энергии	Пучок ускоренных ионов с заданными характеристиками Π_2 КОНЕЧНЫЙ ПРОДУКТ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ	Ток ускоренного пучка в импульсе I_2 Длительность и форма импульса тока пучка Энергия пучка W_2 Фазовый объем пучка на выходе ε_2 Массовый состав пучка на выходе A_2
Система ВЧ-питания (элемент 4)	Ввод ВЧ-мощности в ускоряющие структуры и создание стабильных колебаний ВЧ- поля в резонаторах	Импульс высоковольтного высокочастотного напряжения $U_{\text{вч}}$	Рабочая частота $f_{\text{вч}}$ Амплитудагибающейимпульса вводимой ВЧ-мощности $U_{nад}$ Соотношение амплитуд падающего $U_{nад}$ и отраженного $U_{отр}$ сигналов Уровень спада ВЧ- поля в резонаторе под пучком

Таблица 2. Некоторые общие сведения о системе инжекции линейного ускорителя протонов.

Элемент разбиения установки	Функциональное назначение элемента	Некоторые технологические параметры элемента	Конечный продукт работы элемента	Основные характеристики конечного продукта элемента	Способ определения характеристик в реальной работе : 1) прямые измерения [8]; 2) по измерениям технологических параметров [8,9]; 3) по учету взаимодействия с другими элементами [10]
Система инжекции ионов	Создание пучка ускоренных ионов	$U_{\kappa, \alpha}$ - напряжение клапана напуска водорода в ионный источник t_d - время поджига дуги после напуска водорода I_d - ток дугового разряда U_{um1} - ускоряющее напряжение U_{um2} - формирующее напряжение I_m - ток магнита источника ионов	Пучок ионов Π_0	Ток пучка в импульсе I_0 Длительность и форма импульса тока пучка Энергия пучка W_0 Фазовый объем пучка ε_0 Массовый состав пучка A_0	1) 1) 2) 2) 3)

Список литературы

- [1] Тезисы докладов VII совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. – М., ЦНИИатоминформ, 1992.
- [2] Barbalat O. – Report CERN AC/94-04 (BLIT). Geneva, 1994.

- [3] Грановский В.А. // Вестник РАН, 1994, т.64, N12, с.1140-1141.
- [4] Международные стандарты на системы качества ИСО 9000-9004.
- [5] Фролов К.В. и др. // Наука в России, 1994, N3 (81), с.28-32.
- [6] Автоматизированные системы управления технологическими процессами / Справочник. – Киев, Техника, 1983.
- [7] Боровиков А.А., Хромова Г.Н. – Препринт ИФВЭ 95-35, Протвино, 1995.
- [8] Баков С.М. и др. – Препринт ИФВЭ 89-197, Серпухов, 1989.
- [9] Баков С.М. и др. – Препринт ИФВЭ 88-156, Серпухов, 1988.
- [10] Куторга Н.Н., Севостьянов В.С., Тепляков В.А. – В кн.: Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. – М., Наука, 1972, ч.1, с.88-90.
- [11] Баков С.М. и др. – Препринт ИФВЭ 94-39, Протвино, 1994.
- [12] Боровиков А.А., Хромова Г.Н. // ПТЭ, 1993, N4, с.72-79.
- [13] Боровиков А.А., Хромова Г.Н. // Приборы и системы управления, 1995, N7, с.27-31.
- [14] Румянцев В.В. // Атомная техника за рубежом, 1994, N4, с.18-24.
- [15] Ларичев О.И. // Доклады АН, 1994, т.336, N6, с.750-752.
- [16] Краус М., Кучбах Э., Вошни О. Сбор данных в управляющих вычислительных системах. – М., Мир, 1987.
- [17] Буков В.Н. // АиТ, 1995, N12, с.124-137.

Рукопись поступила 18 апреля 1996 г.

А.А.Боровиков, Г.Н.Хромова.

Модели для определения показателей готовности современной технической установки к эффективному использованию.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L_AT_EX.

Редактор М.Л.Фоломешкина.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 19.04.96. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 2.12. Уч.-изд.л. 1.63. Тираж 180. Заказ 684. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 96-33, ИФВЭ, 1996
