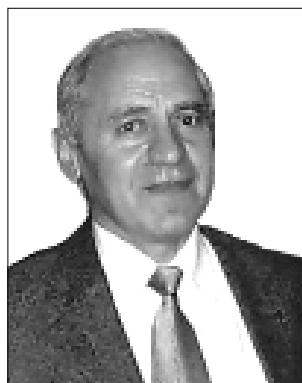
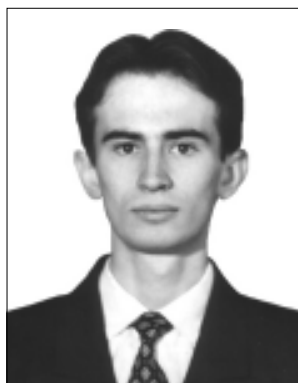


Автоматизированный логический структурный синтез систем управления сложными технологическими объектами:



Д.т.н., профессор Г.Г. Арунянц



К.т.н. Д.Н. Столбовский

методология и алгоритмы

Г.Г. Арунянц, Д.Н. Столбовский

Сложность современных объектов проектирования, особенно систем управления (СУ), постоянное ужесточение требований к проектам, чрезвычайно высокая цена ошибочных проектных решений входят в противоречие с традиционными инструментами и технологией проектирования. Выходом из положения является использование новых принципов проектирования, разработка и внедрение нового набора инструментов – инструментария проектировщика – системы автоматизированного проектирования (САПР).

Основной проблемой в области проектирования сложных систем управления сложных технологических объектов (ТО) является создание методов, рассчитанных на использование ЭВМ и принципов системного анализа, позволяющих выделять основные подсистемы исследуемого объекта, формализовать задачи, цели и функции этих подсистем и механизмы связей между ними, разрабатывать альтернативные структуры СУ ТО и намечать последовательность действий по выбору оптимальных вариантов, по реализации проектных решений и оценке результатов их использования.

Задачи проектирования СУ сложных ТО отличаются от задач проектирования технических устройств других видов большим

удельным весом так называемых задач динамического расчета [1], связанных с выбором структуры и параметров, обеспечивающих заданное качество и точность управления или регулирования. Проектирование СУ по существу является многокритериальной задачей, причем некоторая часть критериев, как правило, не формализована полностью.

Важной характеристикой СУ технологических систем (ТС) является ее сложность. Усложнение системы приводит к понижению ее надежности, повышению эксплуатационных затрат и стоимости системы. Эта проблема в значительной мере относится к проектированию автоматических систем регулирования (АСР) технологических параметров ТО. Совокупность АСР параметров ТО, вследствие множества прямых и обратных связей между технологическими элементами ТО, многомерности самих элементов ТО, в общем случае представляет собой сложную многомерную автоматическую систему регулирования (МАСР). Проектирование этих систем требует разработки корректных методов их декомпозиции, упрощающих процесс синтеза без ущерба для сложности.

Своевременность и актуальность рассматриваемых в настоящей работе проблем заклю-

чается прежде всего в том, что из всех этапов проектирования СУ сложных технологических объектов в ней представлены результаты постановки и решения задачи оптимального структурного синтеза АСР технологических параметров с использованием специально разработанных для этих целей логических правил и эвристических процедур, статических и динамических характеристик анализируемых каналов воздействия, т.к. именно на этом этапе решаются базовые задачи проектирования многомерных АСР сложных объектов: обеспечение устойчивости, качества и надежности управления при минимально возможной сложности.

В результате проведенных исследований основных задач и принципов проектирования СУ ТО показано [2,3], что многоуровневая структура современных СУ ТО диктует необходимость максимальной формализации решений задач автоматизации на всех иерархических уровнях. Эффективность построения таких систем во многом зависит от локальных систем автоматического управления нижнего уровня, осуществляющих функции измерения, регулирования и контроля технологических параметров, характеризующих протекание технологического процесса. Разработка СУ сложными ТО сегодня относится к задачам, эффективное решение которых может основываться только на объединении теоретических представлений о конкретной технологии, теории автоматического регулирования и управления, теории информации, теории оптимальности и теории систем.

Основой решения задач проектирования СУ ТО является синтез, анализ и оптимизация. Отмечается важность и необходимость рассмотрения этих проблем в тесной взаимосвязи и в органическом единстве с принципами процесса принятия проектного решения, который осуществляется на всех этапах решения задачи [4].

Проведенные исследования состояния и анализ особенностей и проблем автоматизации проектирования СУ ТО показали, что основной эффект от внедрения САПР возникает при автоматизации некоторых творческих функций проектировщика на ранних стадиях разработки, когда выбираются принципы дей-

ствия, структура, оптимальные характеристики проектируемого объекта.

С точки зрения методологии автоматизации проектирования СУ необходимо учитывать существенные особенности СУ как объектов САПР, влекущие за собой важные следствия – малый объем исходной информации и большая «цена» проектных решений, присутствующие на ранних стадиях проектирования. Показано, что методологической основой автоматизированного проектирования СУ может служить единая система взаимосвязанных имитационных моделей – основной инструмент проектировщика при оценке и оптимизации проектных решений.

Математически задача проектирования СУ ТО может быть сформулирована следующим образом. Требуется найти структуру, определить параметры и выбрать технические средства СУ, осуществляющей управление

$$m = m(x, v, z, t), \quad (1)$$

при котором достигалась бы максимальная эффективность, т.е.:

$$\max_{m \in M} P^*(m, y, z, v), \quad (2)$$

где

$$M = \{m/y = g(m, z, t), h(m, v, z, t) \geq 0\} \\ \text{мера эффективности, } \mathcal{N}(z) - \text{набор} \\ P^*(\cdot) \text{ ограничений, налагаемых на систему; } v(\cdot) -$$

множество внешних входов, которые связаны с целями и ограничениями управления; $y = g(m, z, t)$ – модель ТС, в которой y, m, z – векторы выходных переменных, управляемых входов и входных возмущений, соответственно; x – множество измеряемых переменных.

Решение задачи проектирования СУ ТО непосредственно в приведенной постановке практически не реализуемо, по причине большой размерности, сложности математических моделей процессов, сложности измерений и т.д. Формулировка (2) модифицируется следующим образом:

$$\max P'(x', v, u), \quad (3)$$

где

$$U = \{u/y' = g'(u, z', \alpha), h(u, x', v) \geq 0, x' = (x' \ x'')\}$$

Здесь знак «прим» означает, что данный

вектор претерпел определенное изменение в своем составе. Это дает управление в форме

$u = \text{Pr}(x, u)$ в многоуровневом управлении первый уровень (прямое управление) играет роль исполнителя решений второго (оптимизирующего) уровня, выражаемых в виде вектора $u = (u_y, u_m)$, где u_y – вектор установок y , который через механизм обратных связей определяет подмножество компонентов вектора управляемых входов ТС – m ; оставшиеся компоненты вектора m определяются непосредственно вектором u_m . В результате для первого уровня имеет место:

$$m = m'(x_1, u, t), \quad (5)$$

где x_1 – измерения, используемые при управляющих функциях.

Переход к многоуровневому методу позволяет преодолеть упомянутые трудности при помощи декомпозиции общей задачи управления на несколько более простых проблем, которые могут быть решены с меньшими усилиями.

Задача оптимизации (3) для удобства представляется в виде:

$$\max_{u \in U(z)} f(u, y, z), \quad (6)$$

где $U(z) = \{u/y = g(u, z), h(u, y, z) \geq 0\}$; f – мера общей эффективности (целевая функция); u – вектор управляющих переменных; y – вектор выходов установки; z – вектор входных возмущений; U – множество возможных u (условное по z); g и h – вектора ограничений в равенствах и неравенствах, соответственно.

Применительно к задаче (6) предполагается, что её можно декомпозировать на N подзадач. Тогда

$$\max_{u_i \in U_i} f_i(u_i, y_i, q_i, z), \quad (7)$$

где $U_i = \{u_i/y_i = g_i(u_i, q_i, z), h_i(u_i, q_i, z) \geq 0\}$;

$$q_i = \sum_{j=1}^N T_{ij} Y_j; \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

Индекс i указывает на принадлежность векторов и функций к i -ой подсистеме. Вектор q_i обозначает входы в подсистему i , которые возникают в результате взаимодействия с другими подсистемами. T_{ij} представляют собой матрицы, состоящие из нулей и единиц, которые объединяют компоненты q_j с соответствующими компонентами Y_j , $j \neq i$. Предполагается также, что:

$$f(u, y, z) = \sum_{j=1}^N f_j(u_j, y_j, q_j, z) \quad (9)$$

и что решения, удовлетворяющие ограничениям u_i ($i = 1, 2, \dots, N$) и ограничениям взаимодействия, удовлетворяют и общей системе ограничений U задачи (6).

Структура иерархической системы управления ТО определена, если выявлены все управляющие, наблюдаемые (измеряемые) переменные и возмущающие воздействия ТО (подсистем ТО), определены информационные, управляющие и координирующие сигналы между уровнями и подсистемами СУ.

С системных позиций весь процесс проектирования, как процесс принятия решения предлагается разбить на три этапа: «**внешнее проектирование**», «**формирование облика**» технической системы и «**внутреннее проектирование**» [5,6]. Основной проблемой «**внешнего проектирования**» является конкретизация целей и задач, которые должна решать система, и формирование требований к основным ее характеристикам, обеспечивающим достижение этих целей. «**Внутреннее проектирование**», по существу, является реализацией (в виде алгоритмического и программного обеспечения, комплекса технических средств, представляющих вместе с элементами объекта саму систему) основных конструктивных параметров системы (облика), придающих ей требуемые качества. Наконец, «**формирование облика**» служит целям конкретной увязки требований «**внешнего проектирования**» с техническими и конструкторскими возможностями «**внутреннего проектирования**». Одной из основных за-

дач «*формирования облика*» является генерирование (на уровне конструктивных параметров) множества альтернативных вариантов проектируемой системы, учитывающего, с одной стороны, возможности «внутреннего проектирования» и, с другой стороны, удовлетворяющего (в рамках этих возможностей) требованиям «*внешнего проектирования*».

Принятый подход к разбиению процесса проектирования на этапы представляется эффективным и в равной мере может быть отнесен к процессу проектирования всех иерархических уровней СУ.

Для решения проблемы разработки машинно-ориентированных методов и алгоритмов автоматизированного логического синтеза АСР параметров сложных ТО предлагается использование процедур построения логических деревьев подзадач управления, основанных на анализе причинных взаимосвязей переменных процесса, представляющихся с помощью причинно-следственного графа $G(N, V)$; N – узлы графа, обозначающие переменные; V – ориентированные дуги, определяющие влияние причины. В общем случае I -му узлу графа может быть инцидентна более чем одна дуга – это отражает различные влияния других узлов на i -ую переменную. Некоторые узлы, соответствующие граничным переменным, не имеют инцидентных дуг. Цикл длиной l представляет собой упорядоченную последовательность различных вершин $\eta = (n_1, n_2, \dots, n_{l+1})$, таких, что $n_1 = n_{l+1}, (\eta_k, \eta_{k+1}) \in V$, $k = 1, 2, \dots, l$. Такой граф отражает сущность установившихся материальных, энергетических и моментных балансовых соотношений без необходимости в больших количествах данных.

При постановке задачи разработки методов и машинно-ориентированных алгоритмов автоматизированного логического выбора структур АСР параметров сложных ТО за основу принималось, что синтез контуров регулирования (организации пар «управляющая переменная – регулируемая переменная») предусматривает выполнение нижеследующих процедур [7].

1. Спецификация целей регулирования

$\theta_i (i = 1, 2, \dots, n)$, охватывающих всю задачу регулирования; зависимость может быть выражена с помощью булевого (логического выражения):

$$C = F_c(\theta_i, i \in n). \quad (10)$$

Специфические цели регулирования θ_i возникают в результате декомпозиции полной (глобальной) задачи управления, а также из ряда соображений безопасности, эксплуатационных ограничений, соблюдения экологических норм, экономики и др.

2. Определение контуров регулирования

$S_{ki} (k = 1, 2, \dots, r)$, реализация которых приводит к достижению целей θ_i . Зависимость между θ_i и S_{ki} выражается с помощью дерева структур регулирования и записывается в виде

$$\theta_i = F_{\theta}(S_{ki}, k \in r). \quad (11)$$

Каждый контур регулирования S_{ki} определяется множеством измеряемых и управляемых переменных, т.е.

$$S_{ki} = (\lambda_{ki}, V_m)(\lambda_{ki}^* V_l), \quad (12)$$

где V_m – множество измеряемых переменных; V_l – множество управляемых переменных; λ_{ki} , λ_{ki}^* – двоичные векторы.

3. Выбор измеряемых и управляющих переменных.

Приведенный подход пригоден для широкого класса процессов и обеспечивает разработку некоторых альтернативных структур управления, число которых может быть уменьшено за счет инженерных эвристик. Оставшиеся должны быть тщательно исследованы с помощью динамических моделей для определения эффективности каждой из структур и выбора наилучшей.

В результате проведенных исследований был выявлен состав основных этапов структурного синтеза (рис.1). Очередность выполнения этих этапов связана с принятой стратегией и реально достигнутыми результатами в



Рис. 1. Этапы, эвристики и логические правила структурного синтеза.

процессе проектирования АСР ТО. Приведенный состав основных этапов лег в основу при разработке специального алгоритмического обеспечения системы LOGSYN автоматизированного структурного синтеза АСР параметров сложных ТО.

Принимая во внимание сложность формализации задач отдельных этапов проектирования АСР, была поставлена и решена задача разработки специальных логических и эвристических правил (рис.1), обобщающих практический опыт, интуицию и знания высококвалифицированных инженеров-проектировщиков.

Для реализации принятой стратегии эволюционного принципа выбора оптимальной организации контуров регулирования сложной ТО разрабатывались два типа эвристик: эвристики первого типа, позволяющие исключить из последующего рассмотрения наименее эффективные варианты организации управления и измерения или выявить узкие места в анализируемых вариантах организации АСР; эвристики второго типа, необходимые для определения возможных вариантов модифика-

ции и усовершенствования узких мест.

Выбор управляющих переменных, реализуемый на этапе 1 (рис.1), осуществляется прослеживанием распространения влияния ограничивающей переменной в сигнальном графе процесса с учетом следующего правила (здесь и далее нумерация приведена в соответствии с рис.1):

1. Входные переменные ($n_1, n_2, \dots, n_m \in X$) объединяются оператором «ИЛИ», если регулирование любой из входных переменных достаточно для регулирования ограничивающей переменной:

$$n_i = (n_j \cup n_l \cup \dots \cup n_m);$$

$$i \in n^* ; n_j, n_l, \dots, n_m \in X.$$

Выбор альтернативных вариантов управления из условий статической компенсации возмущений осуществляется с применением ниже следующих эвристик.

2.1. Пара n_j, θ_i ($n_j \in X, i \in n^*$) исключается из рассмотрения, если

$$\Delta G_j K_{ji} \leq (\Delta G_l K_{li})_{\max}, n_l \in Z.$$

Использование этой эвристики позволяет оставлять для последующего рассмотрения вариант организации контура управления, наилучшим образом удовлетворяющий условию статической компенсации максимально возможного действия возмущений, оцениваемого величиной $(\Delta G_l K_{li})_{\max}$. Здесь $(\Delta G_l)_{\max}$ – максимально возможное изменение параметра возмущения; K_{li} – коэффициент усиления по каналу «параметр возмущения (n_l) – параметр цели (θ_i)».

2.2. Из ряда пар $n_j, \theta_j, \dots, n_l, \theta_l, \dots, n_m, \theta_m$ пара n_l, θ_l наиболее приемлема, если

$$\Delta G_l K_{li} > \Delta G_j K_{ji} > \Delta G_m K_{mi} .$$

Эта эвристика позволяет выбрать вариант организации контура регулирования, включающего параметр управления (n_l), оказывающего наибольшее воздействие на параметр цели (θ_l).

2.3. Пары $n_l, \theta_l, \dots, n_m, \theta_m$ в ряде $n_j, \theta_j, \dots, n_l, \theta_l, \dots, n_m, \theta_m$, ранжированные по ΔGK ($\Delta G_j K_{ji} > \dots > \Delta G_l K_{li} > \dots > \Delta G_m K_{mi}$), исключаются из рассмотрения, если существует единственно возможная или ранее выбранная пара n_l, θ_p ($l, p \in n^*$).

Использование этого правила позволяет исключить из последующего рассмотрения при выборе организации контура управления заданной целью (θ_i) из ранжированного по ΔGK ряда возможных альтернатив вариант организации с параметром управления, являющимся единственным управлением для другой цели (θ_p), и все следующие за ним варианты в общем ранжированном ряду.

2.4. При заданных спецификациях целей $C = F(\theta_i, i \in n^*)$ и векторе возможных управлений X объект неуправляем, если существуют единственно возможные пары

$$n_j, \theta_l, n_j, \theta_p \quad (l, p \in n^*) .$$

Применение данной эвристики позволяет выявить невозможность управления объектом при наличии единственно возможного параметра управления (n_j) для двух различных целей (θ_l, θ_p).

2.5. В структуру управления включается контур стабилизации $n_j, \theta_l, \theta_l^* \Leftrightarrow n_j$, если j -ый параметр оказывает наибольшее влияние на две цели и статическая компенсация его дей-

ствия для одной из них невозможна.

Это правило позволяет формировать контуры стабилизации для параметров, оказывающих влияние по меньшей мере на две цели управления, подавление которого для одной из них невозможно.

Выбор альтернативных вариантов управления с учетом динамических свойств объекта осуществляется в процессе синтеза с использованием нижеследующей эвристики.

3. Из ряда пар $n_j, \theta_j, \dots, n_l, \theta_l, \dots, n_m, \theta_m$ ($i \in n^*; n_j, \dots, n_l, \dots, n_m \in X$), удовлетворяющих условиям статической компенсации возмущений, пара n_l, θ_l наиболее приемлема, если

$$\tau_{li}/T_{li} < \tau_{ji}/T_{ji} < \dots < \tau_{mi}/T_{mi} .$$

Это правило позволяет выбрать наилучшую с точки зрения динамических свойств организацию контура управления. Здесь τ_{li} – время запаздывания по каналу воздействия « l -ый управляющий параметр – i -ая цель управления»; T_{li} – постоянная времени кривой разгона по тому же каналу воздействия.

Выбор измеряемых переменных, реализуемых на этапе 4, осуществляется прослеживанием распространения цели регулирования в сигнальном графе процесса. В некоторых случаях возможно выбрать ограничивающие переменные в качестве регистрируемых переменных.

Если ограничивающая переменная не может быть легко измерена непосредственно, её величину определяют с помощью косвенных измерений других переменных. Эти переменные идентифицируются при прослеживании распространения ограничивающей переменной в сигнальном графе процесса. Логические зависимости («И», «ИЛИ») между граничными и зависимыми переменными находятся с помощью следующих предлагаемых правил:

4.1. Для переменных, на которые влияет ограничение, встретившиеся переменные объединяются с ограничивающей переменной оператором «ИЛИ». Другие переменные, влияющие на встретившуюся переменную, на которую не влияет ограничение, объединяются с встретив-

шейся переменной оператором «И»:

$$n_i = (n_j \cap n_l \cap \dots \cap n_m) ;$$

$$i \in n^* ; n_i, n_l, \dots, n_m \in X .$$

4.2. Для переменных, которые влияют на ограничение, встретившиеся переменные объединяются с ограничивающей переменной оператором «И»:

$$n_i = (n_j \cap n_l \cap \dots \cap n_m) ;$$

$$i \in n^* ; n_i, n_l, \dots, n_m \in X .$$

При выборе альтернативных вариантов организации измерений с учетом динамических свойств объекта применяются ниже следующие эвристики.

5.1. Из ряда альтернативных вариантов измерений i -ой цели $n_i = F(n_j, j \in a)$ ($n_i \leftrightarrow \theta_i; i \in n^; n_j \in Y$) при принятом контуре управления $n_p \theta_i$ вариант $n_m = F(n_j, l \in a)$ наиболее приемлем, если $\tau_{li} > \tau_{mi}$.*

5.2. Параметр θ_i при принятом контуре управления $n_l \theta_i$ неуправляем, если не найден вариант организации его измерения.

5.3. При наличии в анализируемом варианте измерения $n_i = F(n_j, j \in a)$ дискретно измеряемого параметра n_l ($l \in Y_d; l \in a$) формируется вариант $n_j = F((n_j, n_m), j \neq m, j, m \in a)$, если возможно косвенное аналоговое измерение $n_l = F(n_m, m \in a)$.

Выбор вариантов организации измерений с учетом показателя сложности осуществляется с использованием следующих правил.

6.1 Наиболее приемлемы варианты организации измерений, не включающие параметры потоков, связанные между собой или целью через элементы ТО с тепло- и (или) массообменом.

6.2 При наличии нескольких вариантов измерений анализируемой цели с одинаковыми (близкими) значениями показателей сложнос-

ти наиболее приемлемы варианты без дискретных измерений.

Программная реализация всех рассмотренных выше этапов выбора организации контуров управления сложной ТО предусматривает использование в процессе работы комплекса LOGSYN (рис.2) ряда подпрограмм, входящих в состав пакетов прикладных программ подсистем САПР АСР и информационных массивов, сформированных в процессе ее функционирования, а также нижеследующих специально разработанных программных модулей:

ORGSYN – управление процессом синтеза путем последовательного вызова программных модулей;

PREP – расчет динамических характеристик объекта управления и формирования исходных информационных массивов;

REFORM – выявление единственно возможных вариантов управления заданных целей и переформирование матрицы альтернативных вариантов управления (SETCON);

CHOICE – анализ и выбор оптимальных вариантов организации контуров регулирования;

VECIN – формирование матрицы альтернативных вариантов организации измерений заданной цели;

SELIN – выбор варианта измерения цели с минимальной сложностью;

COMCON – выбор альтернативных вариантов связанного регулирования;

COMP – расчет сложности варианта измерения.

Основу алгоритмического обеспечения подсистем комплекса LOGSYN (**REFORM**, **CHOICE**, **VECIN**, **SELIN**) составляют процедуры, реализующие в процессе проектирования представленные выше логические правила и эвристики.

Разработка и реализация специального программного обеспечения комплекса LOGSYN проводилась с учетом необходимости его функционирования в рамках САПР АСР ТО, что определило соответствующие требования к построению базы данных (БД), к форме выходных документов комплекса, к программной реализации отдельных процедур

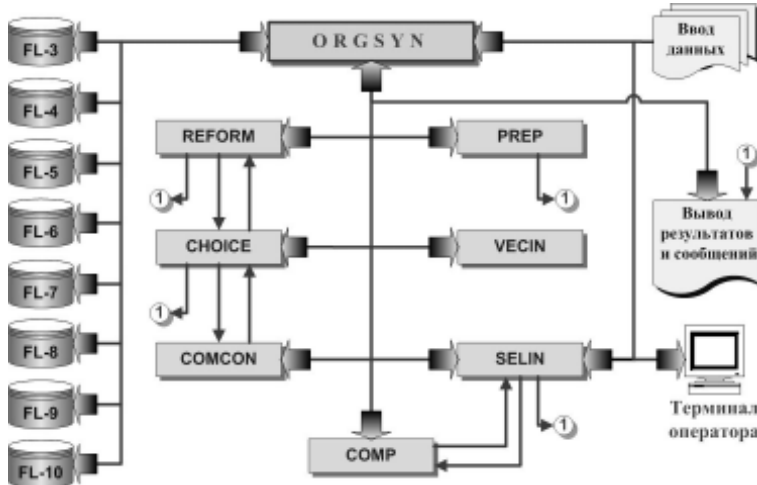


Рис. 2. Структурная схема комплекса LOGSYN.

и подсистем, а также алгоритмом функционирования комплекса в целом.

По результатам расчета основных характеристик кривых разгона по каналам воздействия ТО (модуль **PREP**) формируется полный вектор воздействий (управлений и возмущений) $L(n)$, матрицы времен (τ) запаздывания $TAU(n, k)$, постоянных времен (T) кривых разгона $T(n, k)$ и коэффициентов (K_0) усиления объекта $K_0(n, k)$ для каналов воздействия « $L(n)$ -ый параметр – k -ая цель» ($k = 1, 2, \dots, kk; n = 1, M1 + M4$), проводится ранжирование управляющих параметров в матрице SETCON (процедура **RANGE**) по ΔGK (ΔG -возможное изменение управляющего воздействия; K – коэффициент усиления исследуемого канала воздействия) и исключение из нее параметров, максимальные действия которых на анализируемые цели не компенсируют действий соответствующих этим целям возмущений.

Фрагменты графической интерпретации алгоритмов, реализуемых на отдельных этапах структурного синтеза комплекса LOGSYN, приведены на рис. 3.

Переформирование матрицы SETCON осуществляется в случаях наличия целей, имеющих единственно возможные управления, входящие в векторы других целей. При

этом в случаях нахождения этих параметров на первых местах в рядах управлений других целей осуществляется проверка возможности перевода их с первых мест рядов на последнее путем уменьшения $\Delta G(L(n))$ при условии:

$$\Delta G(L(n)) - \Delta g > \Delta G(L(n))_{\min}, \quad (13)$$

где Δg – необходимое ограничение допустимого изменения управляющего воздействия по $L(n)$ параметру, рассчитываемое по выражению:

$$\Delta g = (\Delta G(L(n))KO(n, K1) - \Delta G(L(n'))KO(n', K1)) / KO(n, K1) \quad (14)$$

где $K1$ – номер цели, в векторе управлений которой присутствует параметр $L(n)$; $L(n')$ – номер параметра, находящегося на последнем месте в ряде управлений $K1$ -ой цели.

При переводе $L(n)$ -го параметра на последнее место в результате уменьшения $\Delta G(L(n))$ и последующего перевода параметра $L(n)$ на первое место в векторе управлений $K1$ -ой цели, и осуществляется запись полученного варианта с единственным управлением в массив **FL-8**.

При невозможности перевода параметра на последнее место выполняется процедура

$$\Delta G(L(n)) = \Delta G(L(n))_{\min} \quad (15)$$

и проверяется условие сохранения его на первом месте после предварительного выполнения процедуры **RANGE** при новом значении $\Delta G(L(n))$.

Невозможность перевода параметра $L(n)$ с 1-го места $K1$ -ой строки выполнением процедуры (15) определяет необходимость проверки возможности реализации этой операции пу-

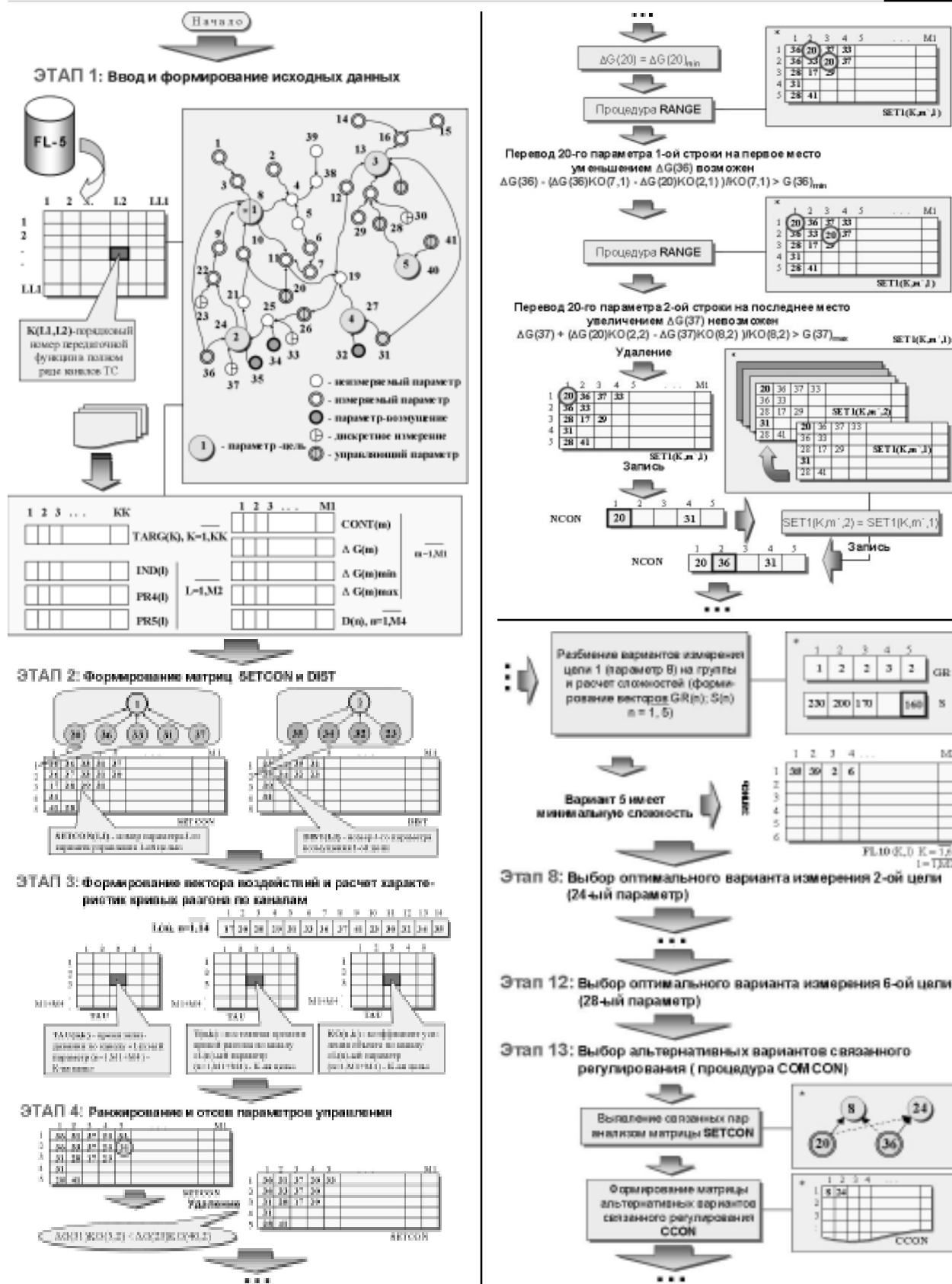


Рис. 3. Фрагменты графической интерпретации отдельных этапов структурного синтеза АСР.

тем увеличения ΔG следующих за ним параметров $K1$ -ой строки при соблюдении условия

$$\Delta G(L(n^*)) + \Delta g < \Delta G(L(n^*))_{\max}, \quad (16)$$

где $L(n^*)$ – номера параметров в $K1$ -ой строке матрицы SETCON, увеличение ΔG которых приводит к сдвигу $L(n)$ -го параметра с 1-го места той же строки; Δg – необходимое ограничение (увеличение) допустимого изменения управляющего воздействия по $L(n^*)$ -му параметру, рассчитываемые по выражению:

$$(17)$$

При выполнении условия (16) для одного из анализируемых параметров $K1$ -ой строки матрицы SETCON осуществляется сдвиг $L(n)$ -го параметра на соответствующее место $K1$ -ой строки после процедуры RANGE и запись выявленного варианта с единственным управлением в массив FL-8.

Все процедуры, связанные с уменьшением ΔG анализируемых управлений, сопровождаются (добавлением) $K0(n, K1)$ –

$$(\Delta G(L(n)) + \Delta g) / \Delta G^*(K, K1) \quad (18)$$

где $\Delta G^* K O^*$ – максимальное возмущение на k -ую.

В случаях выявления единственных управлений анализируемых целей осуществляется запись параметров управлений в FL-8 и проверка на присутствие их в векторах управлений других целей.

Работа модуля REFORM завершается исключением из дальнейшего рассмотрения целей, для которых выявлены единственные управления.

Выбор управляющих параметров для оставшихся целей осуществляется выявлением каналов управления с возможно лучшими динамическими свойствами при соблюдении условий подавления возможных возмущений. Про-

цедура реализуется программой CHOICE.

В качестве показателя динамических свойств объекта принята величина τ/T .

В процессе работы комплекса LOGSYN осуществляется формирование массива стабилизируемых параметров (STAB), обуславливающих необходимость исключения их из последующего рассмотрения при анализе оставшихся целей.

Процесс выбора управлений для всех заданных целей завершается процедурой формирования нижеследующих векторов: целей управления TARG(K) и управляющих параметров NCON(K).

Выявление альтернативных вариантов организации измерений заданной цели управления осуществляется процедурой (программой) VECIN, алгоритмическую основу которой составляет операция прослеживания распространения цели регулирования в сигнальном графе ТС и формирования на его основе массива вариантов прямого и косвенного измерения цели с использованием специальных эвристик, приведенных выше. По результатам логического анализа полного параметрического графа ТС формируется исходный оперативный массив (VEC(I < J), I = 1, 2, ..., LL1,

J = 1, 2, ..., M2). Каждая заполненная I-ая строка VEC представляет собой набор параметров, объединенных в результате логического анализа оператором «И». Число заполненных строк, равное числу вариантов организации измерения анализируемой цели, выявляется в результате логического объединения параметров через оператор «ИЛИ».

Сформированный набор альтернативных вариантов измерения анализируемой цели подвергается обработке в программном модуле SELIN с целью выбора варианта с минимальной сложностью.

Расчет сложностей вариантов организации измерений (процедура COMP) осуществляется по ниже приведенным выражениям:

для измерений, связанных с одним параметром:

$$S(n) = S_0, \quad (19)$$

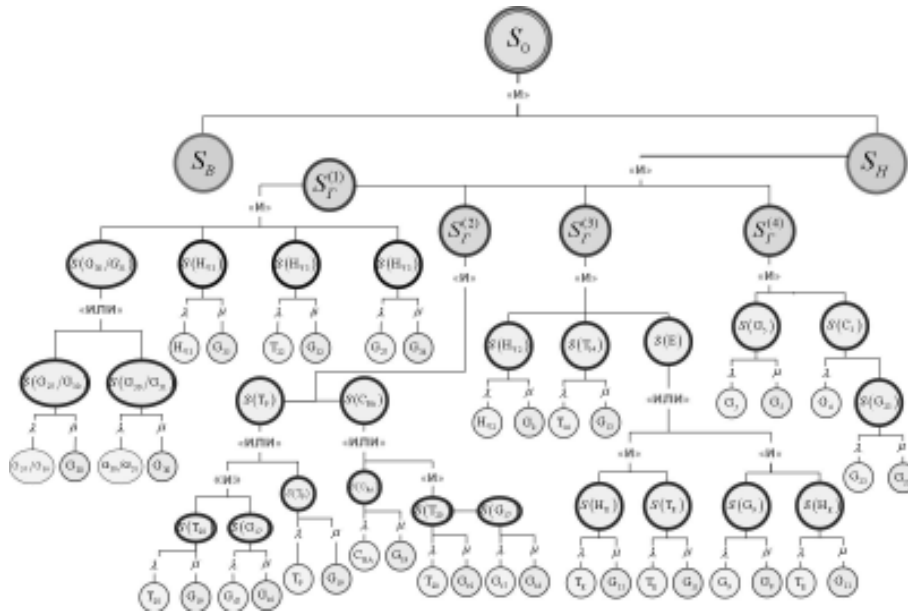


Рис. 4. Укрупненная блок-схема программы ORGSYN.

где S_0 – расчетная сложность системы непосредственного измерения;

для измерений, связанных с несколькими параметрами:

$$S(n) = \sum_{i=1}^M S_{oi} + \sum_{j=1}^{M1} S_{fj}, \quad (20)$$

где S_{oi} – расчетная сложность системы непосредственного измерения i -го параметра вектора измерения цели; S_{fj} – расчетная сложность j -го функционального устройства, необходимого для реализации аналогового измерения цели; M – число параметров вектора измерений цели; $M1$ – число функциональных элементов реализуемой системы аналогового измерения.

Результатом работы модуля **COMP** является выбор варианта организации измерения анализируемой цели, характеризующегося минимальной сложностью.

Выбор альтернативных вариантов связанного регулирования (**COMCON**) осуществляется по завершении выбора измерений для всех заданных целей с целью выявления групп целей со взаимовлияющими параметрами управления.

Управление работой комплекса **LOGSYN** осуществляется программой **ORGSYN**, осуще-

ствляющей вызов и стыковку отдельных программ комплекса в соответствии с алгоритмом его функционирования (рис.4).

Последовательность выполнения этапов определяется принятыми решениями по результатам выполнения отдельных процедур проектирования АСР ТО.

В результате работы комплекса **LOGSYN** формируются дерево целей, задач и структур регулирования параметров анализируемого технологического объекта, оптимальные с точки зрения сложности и удовлетворяющие требованиям управляемости, наблюдаемости и укрупненным требованиям качества и надежности.

Проверка эффективности полученных в настоящей работе результатов проводилась сравнительным анализом результатов традиционного проектирования АСР конкретного ТО с результатами проектирования АСР того же ТО, полученными с использованием предложенных методов и алгоритмов автоматизированного логического синтеза АСР сложных ТО. В качестве объекта управления было выбрано хорошо описанное в литературе производство винилацетата (ВА), носящее ярко выраженные характеристики сложного, нестационарного, многосвязного объекта, управление которым осуществляется двухуровневой АСУ ТП с развитым нижним (исполняющим) уровнем, оснащенным множеством локальных АСР технологических параметров. На основании проведенных предварительных исследований технико-экономических особенностей рассматриваемого объекта в качестве критерия его эффективности отделения синтеза ВА с N технологическими линиями был принят приведенный доход (R_0) :

приведенный доход (R_0) :

$$R_0 = \sum_{i=1}^N R_i = \sum_{i=1}^N (G_{B,i} \Pi_B - G_{A,i} \Pi_A - G_{Y,i} \Pi_Y - Z_i), \quad (21)$$

где R_i – оценка эффективности работы i -ой технологической линии; $G_{A,i}$, $G_{Y,i}$, $G_{B,i}$ – соответственно расходы ацетилена, уксусной кислоты и выработка винилацетата i -ой технологической линией за планируемый период времени; Π_A , Π_Y , Π_B – цены единиц количества соответствующих продуктов; Z_i – затраты на катализатор на i -ом реакторе за планируемое время.

Ограничением при решении задачи управления отделением является величина среднесуточного потребления свежего ацетилена G_0 за планируемый период работы (среднесуточная нагрузка по ацетилену). Изменения нагрузки отделения по ацетилену могут носить как характер плановых возмущений (тип А), рассчитанных на длительный период времени (месяц, квартал и т.д.), так и характер относительно кратковременных возмущений, связанных, например, с нарушениями в работе предприятия – поставщика сырья (тип Б).

При принятых допущениях задача оптимального управления отделением синтеза с учетом ограничений, обусловленных технологическими требованиями, формализуется следующим образом. Необходимо осуществить управление $v(\tau) \in V$, при котором достигался бы максимум критерия

$$R_0 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{t_{np,i} - t_n} R_i \Big|_{t_n}^{t_{np,i}} \quad (22)$$

при ограничениях:

$$\frac{1}{t_n - t_n} \sum_{i=1}^N \int_{t_n}^{t_n} g_{A,i}(\tau) d\tau = G_0, \quad (23)$$

$$g_{A,i}(\tau) = g_{A,i}^*(\tau), \quad \tau \in [t_n, t_{np,i}], \quad (24)$$

$$C_{36}^{(i)}(\tau) \in C_g, \quad (25)$$

$$T_p^{(i)}(l, \tau) \in T_g, \quad (26)$$

$$\tau \in [t_n, t_{np,i}] \quad (27)$$

и при действии на объект вектора возмущений $W(\tau)$, где: $g_{A,i}(\tau)$ – текущая нагрузка по ацетилену; $g_{A,i}^*(\tau)$ – прогнозируемая нагрузка по ацетилену, соответствующая проектному режиму работы при возмущениях типа А и режимах работы, рассчитанных для предшествующих возмущений типа А, при возмущениях типа Б; $C_{36}^{(i)}(\tau)$ – вектор концентраций потока 36; $T_p(l, \tau)$ – температура в l -ом сечении трубного пространства реактора; верхняя и нижняя индексация « i » обозначает принадлежность параметра к i -ой технологической линии. $v(\tau)$ – вектор управляющих переменных.

Постановка задачи управления в форме (22) – (27) позволяет путем прогноза состояний объекта в будущем наиболее полно учесть последствия от принимаемых решений на текущем интервале решения задачи.

В результате проведенной вертикальной декомпозиции общей задачи управления система управления отделением синтеза ВА представлялась двухуровневой СУ, на верхний уровень возлагается решение задач определения оптимального управления в предположении квазистационарности объекта (S_B), на нижний – перевод объекта в заданное верхним уровнем состояние (S_n). Дальнейшие этапы декомпозиции ставят целью выявление альтернативных пар регулируемых и управляющих переменных, отвечающих установленным целям управления, и определение состава вектора переменных, задаваемого верхним уровнем СУ. Результат проведенного логического структурного синтеза АСР параметров объекта с использованием предложенных методов и алгоритмов приведен на рис.5.

Таким образом, в соответствии с проведенным анализом, дерево подзадач и контуров управления, обеспечивающих решение задачи управления на нижнем уровне СУ, имеет следующую логическую формулу:

$$S_n : (\lambda(H_{V3}), \mu(G_{35})) \wedge (\lambda(T_{22}), \mu(G_{32})) \wedge (\lambda$$

Выбранные контуры регулирования послужили основой для разработки структуры АСР нижнего уровня СУ анализируемого объекта (рис.6).

Эффективность разработанных в настоящей работе методики и машинно-ориентированных алгоритмов логического структурного синтеза АСР параметров сложных технологических объектов оценивалась сравнением результатов проектирования АСР параметров реакторного отделения синтеза винилацетата традиционными (неавтоматизированными) методами (на рис.6 варианты 1, 2 – по числу спроектированных объектов) с результатами проектирования АСР параметров того

$$\wedge (\lambda(G_{27}), \mu(G_{34})) \wedge (\lambda(G_{27}/G_{30}), \mu(G_{30})) \wedge$$

$$\wedge (\lambda(T_{20}), \mu(G_{19})) \wedge (\lambda(G_{17}), \mu(G_{16})) \wedge$$

$$\wedge (\lambda(H_{V2}), \mu(G_8)) \wedge (\lambda(T_{14}), \mu(G_{13})) \wedge$$

$$\wedge (\lambda(T_E), \mu(G_{11})) \wedge (\lambda(H_E), \mu(G_9)) \wedge$$

$$\wedge (\lambda(G_5), \mu(G_5)) \wedge (\lambda(G_{23}), \mu(G_{23})).$$

(28)

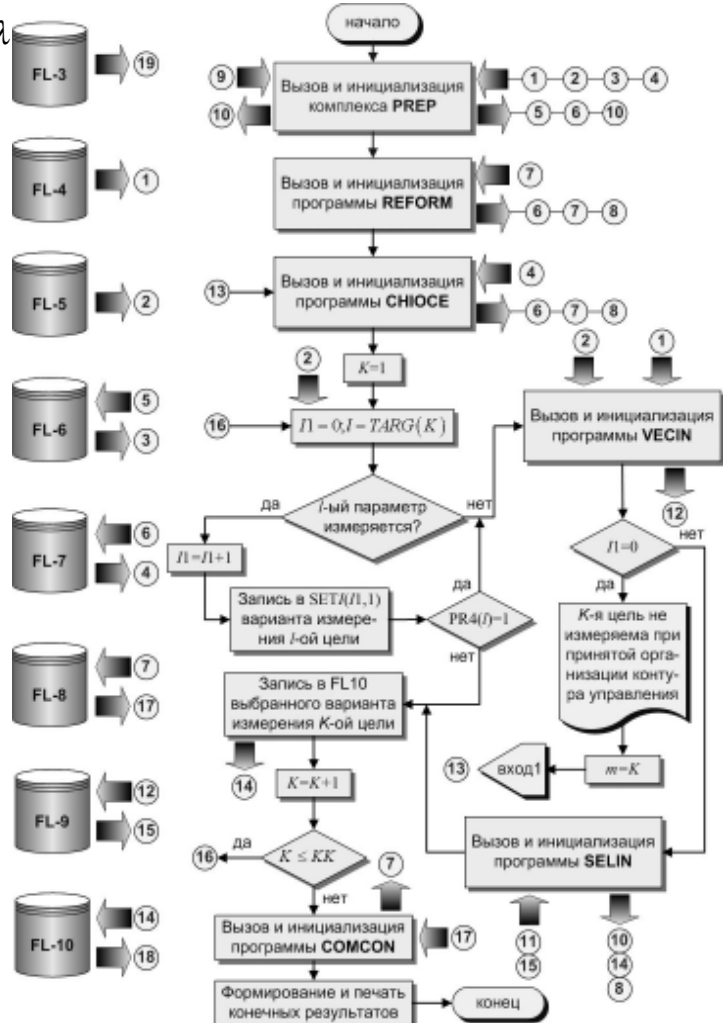


Рис. 5. Результат логического структурного синтеза АСР параметров.

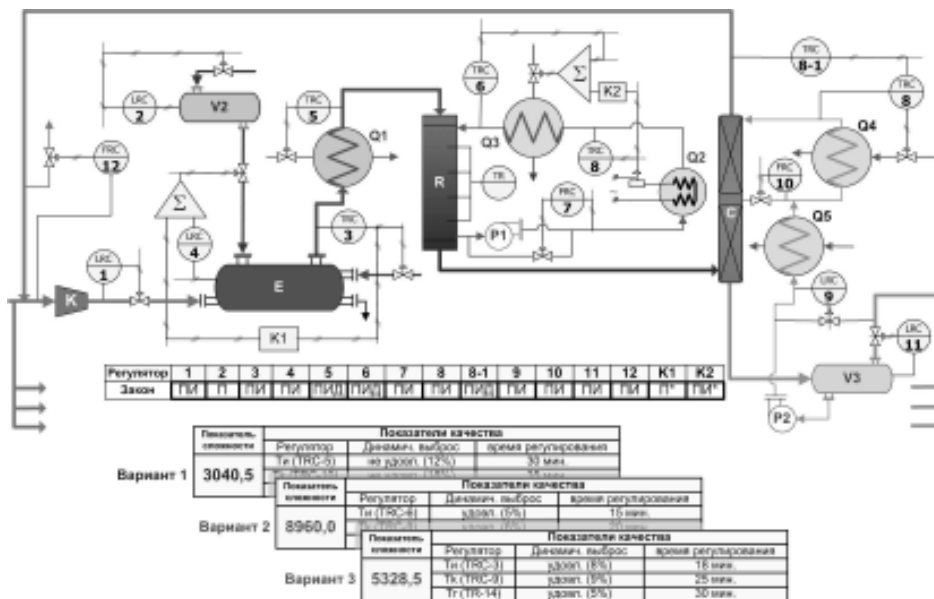


Рис. 6. Структура АСР нижнего уровня СУ с анализом эффективности различных вариантов реализации.

же объекта с использованием разработанных в настоящей работе методов и машинно-ориентированных алгоритмов (на рис.6 вариант 3). Установлено, что время решения поставленной задачи проектирования с использованием автоматизированных процедур комплекса LOGSYN несравненно (более чем на порядок) мало относи-

тельно времени, затраченного при неавтоматизированном способе проектирования. Кроме того, применение разработанных методик и алгоритмов автоматизированного логического синтеза АСР обеспечивает выполнение всех заданных исходных требований по качеству управления при минимально возможной сложности АСР объекта в целом.

Литература

1. **Арунянц Г.Г., Даниелян А.С.** Анализ динамических характеристик химико-технологических объектов при разработке систем автоматического управления. 1981. 72с. (Обзор. информ. / НИИТЭХИМ, Сер. Общеотраслевые вопросы хим. пром. Вып. 7 (189)).
2. **Кафаров В.В. и др.** Системный подход к совместному проектированию ХТС и САУ. – Приборы и системы управления, 1979, №7.
3. **Wilson I.D.** Three applications of decomposition method for designing hierarhical control system. «Inter. I. Cjntr.», 1979, 29, №6. P. 935-947.
4. **Зайцев И.Д.** Моделирование процессов автоматизированного химико-технологического проектирования. – М.: Химия, 1976. - 184с.
5. **Краснощеков П.С. и др.** Декомпозиция в задачах проектирования. – Изв. АН СССР: сер. Техническая кибернетика, 1979, №2. С. 7-17.
6. **Арунянц Г.Г., Пагиев К.Х., Текиев В.М.** Автоматизированный синтез и анализ многомерных систем управления технологическими объектами. – Владикавказ: Иростон, 2000. 268 с.
7. **Столбовский Д.Н., Арунянц Г.Г.** Особенности машинной реализации процедур логического структурного синтеза САР параметров сложных объектов // Труды молодых ученых. – Владикавказ, 2002., вып. 1.

