



НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ПО ПЕРЕХОДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, С.В. Петров (МЭИ)

Рассматриваются алгоритмы и программы, реализующие возможные варианты практической реализации методов настройки регуляторов по переходным характеристикам системы управления с непосредственным применением к ним преобразования Фурье без аппроксимации аналитическими выражениями.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, система автоматического управления, оптимальная настройка, переходная характеристика, комплексная частотная характеристика, преобразование Фурье.

В [1, 2] был рассмотрен новый метод настройки регуляторов по экспериментальным переходным характеристикам (ПХ) подсистем автоматического регулирования (САР) систем автоматического управления (САУ). В существующих подобных методах (представленных как в отечественных [3 – 6], так и в зарубежных публикациях, например, в известном экспертном EXACT-алгоритме фирмы Foxboro [7]) при экспериментальной оценке модели системы (идентификации) свойства экспериментальной ПХ обычно определяются двумя показателями – степенью затухания колебания и его периодом. Но подобным способом надежно оценить можно только свойства САР, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями второго порядка. Поэтому существующие методы, давая, как правило, приемлемые результаты при настройке ПИ-регуляторов в САУ ТП, оказались практически непригодными для настройки ПИД-регуляторов.

В [1, 2] эта трудность была обойдена путем перехода в частотную область сразу после оценки ПХ перестроением ее в КЧХ без предварительной аппроксимации аналитическим выражением. Для перестроения ПХ в КЧХ использовался известный способ [4], имитирующий реально выполняемый эксперимент по оценке частотных характеристик на объектах управления в производственных условиях. Это делает метод наглядным, доступным для контроля всех этапов расчета. Кроме того, необходимые расчеты могут быть выполнены с применением простейших вычислительных средств, вплоть до калькуляторов (заметим, что в момент их публикации в распоряжении инженеров были только логарифмическая линейка и механический арифмометр).

Наличие современной вычислительной техники (даже простых ноутбуков) позволяет изложенную общую идею метода реализовать непосредственным применением к ПХ САР $h(t)$ преобразования Фурье:

$$H(j\omega) = \int_0^{\infty} h(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

после чего КЧХ системы находится по обычной формуле:

$$\Phi(j\omega) = \frac{H(j\omega)}{X(j\omega)}, \quad (2)$$

где $X(j\omega)$ – изображение входного воздействия, которое для единичного ступенчатого воздействия определяется формулой:

$$X(j\omega) = \frac{1}{j\omega}. \quad (3)$$

Промышленные САР имеют, как правило, несколько входов/выходов, и при использовании методов настройки по ПХ системы необходимо придерживаться определенного правила их выбора. Прежде всего, должна оцениваться только та из характеристик, по которой можно будет определить КЧХ регулирующего канала объекта. Модель именно этого канала оптимально необходима для последующего расчета оптимальной настройки регулятора вне зависимости от применяемого критерия оптимальности. Кроме того, соображения практической применимости методов требуют, по возможности, минимизировать отклонение регулируемых величин в процессе проведения эксперимента. Рассмотрим некоторые возможные варианты.

Оценка КЧХ объекта подачи на САР ступенчатого задающего воздействия

Остановимся на случае, когда выходной величиной выбрано изменение регулируемой величины. Учитывая требование к оригиналу изображения Фурье быть абсолютно интегрируемым (то есть его график должен иметь ограниченную площадь), результат экспериментальной оценки ПХ САР следует представить в виде суммы переходной и установившейся составляющих:

$$h(t) = h_{\text{пер}}(t) + h_{\text{уст}},$$

и применить преобразования Фурье только для первой из них. Поскольку установившуюся составляющую можно считать ступенчатой функцией, изображение которой:

$$H_{ycm}(j\omega) = \frac{h_{ycm}}{j\omega},$$

то изображение ПХ можно представить следующим образом:

$$H(j\omega) = H_{nep}(j\omega) + \frac{h_{ycm}}{j\omega},$$

где $H_{nep}(j\omega)$ – изображение $h_{nep}(t)$. Воспользовавшись теперь формулами (2) и (3), получим следующее выражение для КЧХ системы:

$$\Phi(j\omega) = H_{nep}(j\omega) j\omega + h_{ycm}. \quad (4)$$

Эта КЧХ связана с КЧХ объекта $W_{об}(j\omega)$ и регулятора $R(j\omega)$ соотношением:

$$\Phi(j\omega) = \frac{R(j\omega)W_{об}(j\omega)}{1 + R(j\omega)W_{об}(j\omega)},$$

и КЧХ объекта находится с помощью формулы:

$$W_{об}(j\omega) = \frac{1}{R(j\omega)} \frac{\Phi(j\omega)}{1 - \Phi(j\omega)}. \quad (5)$$

Напомним, что фигурирующая в приведенных формулах КЧХ регулятора является в определенном смысле "идеализированной", записанной "в паспорте" регулятора. В ней не учитываются реально существующие погрешности конструктивной реализации, которые в результате настройки по характеристике системы автоматически переносятся в модель объекта. В этом, собственно, и состоит один из резонансов применения методов настройки (адаптации) по характеристикам системы. В противном случае отпала бы необходимость в изложенной относительно громоздкой процедуре получения модели объекта – значительно проще было бы получить прямо экспериментальную характеристику объекта (хотя и здесь существуют определенные проблемы, в частности, проблема выбора критерия близости модели [6]).

Произведя описанный выше эксперимент и выполнив соответствующую обработку его результатов для нескольких частот, можно получить участок КЧХ объекта, достаточный для расчета оптимума настройки любого из применяемых на практике регуляторов (обычно ПИ или ПИД) без аппроксимации этой характеристики аналитическим выражением. Соответствующие методы можно найти в [4-6]. Тем не менее, наличие аналитического описания модели позволяет значительно быстрее получить результат.

Практический опыт расчетов свидетельствует, что здесь можно обойтись сравнительно простой структурой модели объекта, ограничившись небольшим числом точек аппроксимации КЧХ объекта (если частоты аппроксимации принадлежат существенному для настраиваемой САР диапазону). В большинстве случаев достаточно ограничиться только двумя такими частотами, применив аппроксимацию КЧХ объекта моделью вида:

$$W_{mod}(j\omega) = \frac{k_{mod} e^{-j\tau\omega}}{(j\omega\beta\tau + 1)^n},$$

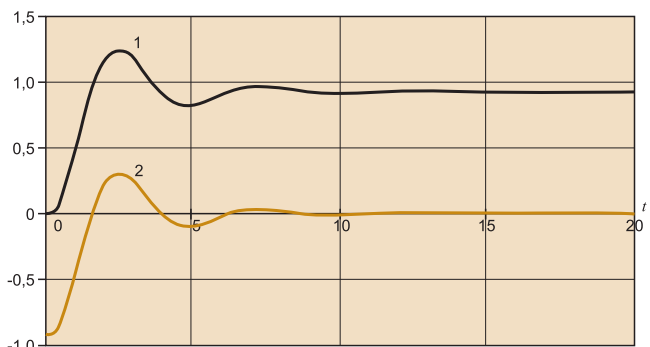


Рис. 1

где k_{mod} , β , τ , n (показатель степени необязательно целый) – постоянные коэффициенты. Возможный метод аппроксимации, а также последующего затем методы расчета оптимума настройки регуляторов изложены в [6, 1, 2] и здесь рассматриваться не будут.

После установки найденных параметров настройки в регуляторе, описанную выше процедуру настройки следует повторить с целью подтверждения их соответствия действительному оптимуму настройки. Не исключено, что подобное повторение придется выполнить несколько раз, так что поиск оптимума оказывается итерационным. Об окончании поиска свидетельствует совпадение результата очередного шага с предыдущим.

В нижеследующих примерах будет рассматриваться тот же регулируемый объект, что и в [2]; его ПФ:

$$W_{об}(s) = \frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (6)$$

При $k = 1$; $T_1 = 7$ мин; $T_2 = 1$ мин; $\tau = 0,1$ мин. Их содержание будет ограничено только иллюстрацией получения КЧХ объекта рассматриваемыми здесь методами. В примерах будет использована с некоторыми несущественными изменениями программа цифрового моделирования, приведенная в [6] на рис. 5.8. Эта программа дублируется на сайте кафедры АСУТП МЭИ <http://acswww.mpei.ac.ru> и может быть скопирована на ПК пользователя для работы с ней.

Пример 1

Начальная настройка регулятора в принципе может быть любой, позволяющей выполнить эксперимент по оценке требуемой характеристики САР. Здесь и в следующем примере выберем ее такой же, как в [2], то есть будем считать, что в регуляторе установлен П закон регулирования и выполнен поиск такого значения его коэффициента передачи k_p , при котором система окажется вблизи границы апериодичности. Приемлемое с этой точки зрения его значение было принято равным $k_p = 13$. График ПХ по каналу "изменение заданного значения регулируемой величины – регулируемая величина" для этого случая приведен на рис. 1 кривой 1. Из него видно, что переходная характеристика имеет слабоколебательный характер с периодом колебания $T = 5$ мин. Начинаем поиск вектора КЧХ объекта для этого периода (частота $\omega = 1,257$ мин⁻¹).

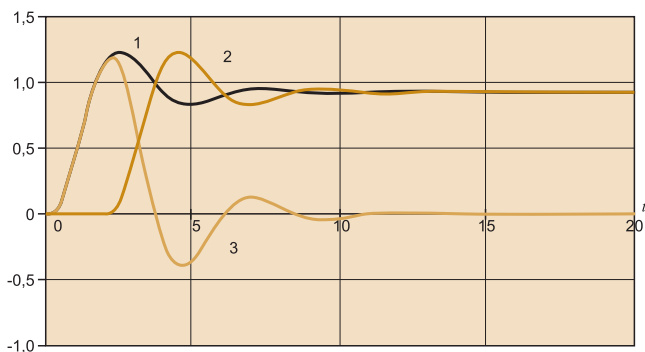


Рис. 2

ПХ имеет установившуюся составляющую $y_{уст} = 0,929$, так что для определения вектора КЧХ системы из ПХ следует выделить переходную составляющую $y_{nep}(t) = y(t) - y_{уст}$ (рис. 1, кривая 2), изображение которой и подлежит определению. Поскольку обычно результаты эксперимента по оценке ПХ представляются в дискретном виде как последовательность чисел с интервалом квантования по времени Δt , следует также соответствующим образом изменить формулу прямого преобразования (1):

$$Y_{nep}(j\omega) = \Delta t \sum_{k=0}^n y_{nep}(k \Delta t) e^{-j \frac{2\pi}{g} k}, \quad (7)$$

где $g = T/\Delta t$ – число дискретных значений ПХ на периоде колебания, n – общее число экспериментальных дискретных значений ПХ до ее полного установления. Результат расчета $Y_{nep}(j1,257) = -1,147 + j0,508$ и формула (4) дает следующее значение вектора КЧХ системы $\Phi(j1,257) = 0,29 - j1,442$, а формула (5) – значение вектора КЧХ объекта $W_{об}(j1,257) = 0,07 e^{-j2,485}$. Заметим, что в [2] было получено $W_{об}(j1,257) = 0,07 e^{-j2,487}$; точное значение этого вектора, соответствующее формуле (6) $W_{об}(j1,257) = 0,07 e^{-j2,483}$.

Естественно, что выходной величиной может быть выбрано не изменение регулируемой величины, а ее отклонение от заданного значения с соответствующим изменением КЧХ системы.

Оценка КЧХ объекта подачи на САР импульсного задающего воздействия

Выбор регулируемой величины в качестве выходной приводит к необходимости довольно длительного наблюдения за оценкой ПХ системы при отклонении, близком к изменению задания. Длительность подобного отклонения может быть уменьшена, если при приближении отклонения выходной величины к своему максимуму убрать входное воздействие, предоставив выходной величине возможность свободно возвращаться к прежнему уровню. Иначе говоря, вместо ступенчатого воздействия на вход системы следует подать воздействие в виде прямоугольного импульса. Достоинство такого способа проведения эксперимента состоит также в том, что реакция системы на прямоугольный импульс абсолютно интегрируема вне зависимости от используемого в регуляторе закона регули-

рования, и, следовательно, к ней непосредственно может быть применено преобразование Фурье.

КЧХ системы по-прежнему определяется формулой (2), но только в числителе должно быть изображение регулируемой величины как реакции на изменение задания в виде прямоугольного импульса длительностью T , а в знаменателе – изображение этого импульса:

$$X(j\omega) = A \frac{1 - e^{-j\omega T}}{j\omega}, \quad (8)$$

где A – его амплитуда.

Если эксперимент состоял в подаче ступенчатого воздействия, реакция на импульсное воздействие может быть достаточно просто найдена расчетным путем. Для этого следует вычесть из переходной характеристики ее же, но сдвинутую на длительность импульса.

Пример 2

Выберем длительность импульса $t_{имп} = 2$ мин. На рис. 2 показаны как экспериментальная ПХ, взятая из рис. 1 (кривая 1), так и ее смещенный вид (кривая 2). Их разность

$$z(t) = y(t) - y(t - t_{имп})$$

представляет собой реакцию на такой импульс (кривая 3). Изображение этой реакции по-прежнему определяется формулой (7), а изображение входного прямоугольного импульса – формулой (8). Применение формулы (2) для той же частоты $\omega = 1,257 \text{ мин}^{-1}$ дает такой же результат $\Phi(j1,257) = 0,29 - j1,441$.

Оценка КЧХ объекта изменением регулирующего воздействия на систему

Рассмотренные выше методы идентификации подачей ступенчатого или импульсного изменения задания регулятору может привести к существенным ошибкам, если закон регулирования формируется с использованием дифференцирования ошибки регулирования. В этом случае регулятор выходит из режима нормального функционирования из-за появления больших (теоретически – даже бесконечно больших) бросков сигнала на выходе дифференциаторов. Подобная ситуация имеет место, например, в САР с ПИД-регуляторами, передаточная функция (ПФ) которых близка к идеализированной:

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (9)$$

где k_p , T_i , T_d – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования.

Эта трудность может быть устранена, если вместо изменения заданного значения регулируемой величины на вход объекта подавать возмущение со стороны регулирующего органа, регистрируя затем изменение его положения. Привлекательность такого эксперимента состоит также в том, что регулятор во время его проведения продолжает нормально функционировать, возвращая регулируемую величину к заданному значению.

К сожалению, на практике выполнить подобный эксперимент часто оказывается затруднительно, поскольку

это может быть связано с существенным нарушением технологического регламента работы объекта. Тогда эксперимент можно несколько изменить, не теряя при этом его положительного свойства. Так, активный эксперимент по оценке модели объекта может состоять в инициируемом извне быстром изменении положения регулирующего органа из начального состояния до некоторого нового, в значительной мере, произвольного положения. Практически для этого достаточно на короткое время перевести работу системы с автоматического на ручной или дистанционный режим управления и с максимально возможной скоростью переместить регулирующий орган в новое положение. После этого вновь перевести работу системы в автоматический режим, позволив регулятору вернуть регулирующий орган к прежнему состоянию.

Остановимся на случае, когда выходной величиной системы выбрано перемещение регулирующего органа $\mu(t)$. Поскольку серводвигатель может считаться интегрирующим звеном с КЧХ:

$$W_{co}(j\omega) = \frac{k_{\omega 0}}{j\omega},$$

то принудительное перемещение регулирующего органа до его значения μ_0 , а затем его возвращение к исходному положению может при определенных условиях рассматриваться как изменение, вызванное воздействием на вход серводвигателя прямоугольного импульса с КЧХ (8). Эти условия сводятся к тому, что длительность импульса должна быть достаточно малой, такой, что за время его действия не произойдет заметного изменения регулируемой величины, и регулятор не успеет оказать влияния на регулирующий орган.

Изображение перемещения регулирующего органа будет в этом случае определяться формулой:

$$M(j\omega) = \frac{1}{1 + W_{co}(j\omega)R(j\omega)} \frac{k_{co}}{j\omega} A \frac{1 - \exp(-Tj\omega)}{j\omega},$$

Имея в виду, что $k_{co}AT = \mu_0$, то есть $k_{co} = \mu_0/TA$, последняя формула может быть переписана следующим образом:

$$M(j\omega) = \frac{1}{1 + W_{co}(j\omega)R(j\omega)} \frac{\mu_0}{j\omega T} \frac{1 - \exp(-Tj\omega)}{j\omega}. \quad (10)$$

Тогда КЧХ системы:

$$\Phi_1(j\omega) = \frac{1}{1 + W_{co}(j\omega)R(j\omega)} \quad (11)$$

может быть найдена по изображению $M(j\omega)$ с помощью формулы:

$$\Phi_1(j\omega) = j\omega M(j\omega) \frac{1}{\mu_0} \frac{jT\omega}{1 - \exp(-Tj\omega)}. \quad (12)$$

В частности, при $T \rightarrow 0$ эта формула упрощается:

$$\Phi_1(j\omega) = j\omega \frac{M(j\omega)}{\mu_0}. \quad (13)$$

*Наука не отвечает на все вопросы,
зато помогает понять бессмысленность многих из них.*

Х. Ягодзинский

В свою очередь, по известной $\Phi_1(j\omega)$ из (11) может быть найдена и КЧХ объекта

$$W_{oo}(j\omega) = \frac{1}{R(j\omega)} \left(\frac{1}{\Phi_1(j\omega)} - 1 \right). \quad (14)$$

Если в процессе проведения эксперимента наблюдаются заметные пульсации регулирующего воздействия, может оказаться целесообразным оперировать с изменением регулируемой величины системы, изображение которой определяется формулой:

$$Y(j\omega) = \frac{W_{oo}(j\omega)}{1 + W_{oo}(j\omega)R(j\omega)} \frac{\mu_0}{j\omega T} \frac{1 - \exp(-Tj\omega)}{j\omega}.$$

КЧХ системы в этом случае принимает вид:

$$\Phi_2(j\omega) = \frac{W_{oo}(j\omega)}{1 + W_{oo}(j\omega)R(j\omega)}.$$

Она может быть определена по изображению $Y(j\omega)$ с помощью формулы:

$$\Phi_2(j\omega) = j\omega Y(j\omega) \frac{1}{\mu_0} \frac{jT\omega}{1 - \exp(-Tj\omega)},$$

а КЧХ объекта найдена по формуле:

$$W_{oo}(j\omega) = \frac{\Phi_2(j\omega)}{1 - R(j\omega)\Phi_2(j\omega)}.$$

Пример 3

В начале поиска оптимума настройки имеет место определенный произвол в выборе закона регулирования регулятора, в частности, это может быть простейший П-регулятор. При повторной настройке, а также при подстройке САР в процессе последующей нормальной эксплуатации (адаптации) приходится все же работать с предусмотренным проектом САР законом регулирования. В этом случае при настройке ПИД-регуляторов следует обращаться к рассматриваемому методу настройки с принудительным изменением начального положения регулирующего органа.

Рассмотрим этот случай подробнее, причем учтем, что поскольку рассчитанная в предыдущих примерах КЧХ объекта практически не отличается от КЧХ, которая была найдена в [2], настройка регуляторов также должна совпадать. В частности, для идеализированного ПИД-регулятора с ПФ (9) там были получены следующие параметры настройки: $k_p = 94$; $T_u = 0,94$ мин; $T_o = 0,34$ мин.

На рис. 3 показаны графики, которые получаются при проверке указанных результатов настройки кратковременным переводом системы на ручное управление и быстрым (практически мгновенным) изменением положения регулирующего органа. Эти графики получены с помощью приведенной в [6] программы на рис. 5.8 книги, из которой устраняются внешнее воздействие, а интегральной составляющей закона регулирования дается началь-

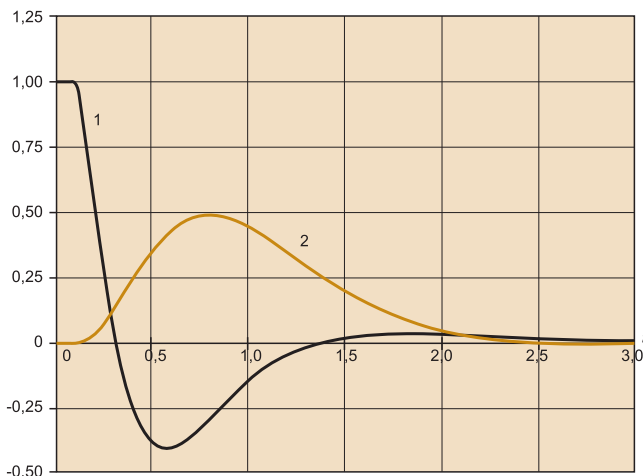


Рис. 3

ное отклонение. Кривая, обозначенная индексом 1 (нормирована к единице), определяет движение регулирующего органа, а индексом 2 — сопутствующее изменение регулируемой величины (для возможности помещения последней на одном графике ее ординаты увеличены в 50 раз). Определение КЧХ системы в этом случае может быть сделано по формуле (11). Применяя дискретную форму преобразования Фурье (7) к процессу изменения положения регулирующего органа для частоты $\omega = 1,257 \text{ мин}^{-1}$, получим: $M(j; 1,257) = 0,038^{-j0,122}$. Следовательно, вектор КЧХ объекта, получаемый по формулам (13) и (14) будет таким: $W_{об}(j; 1,257) = 0,076e^{-j2,883}$. Результат оказался достаточно близким к рассмотренным выше другим способами идентификации.

Если принудительное перемещение осуществляется переключением системы на дистанционное управление со сравнительно медленной скоростью перемещения регулирующего органа, начальное его перемещение уже не может считаться мгновенным. Происходящие при этом процессы при выводе системы в режим дистанционного управления на время $T = 0,1$ мин иллюстрирует рис. 4, где как и прежде индексами 1 и 2 показаны графики изменения положения регулирующего органа и отклонения регулируемой величины соответственно (в программе рис. 5.8 добавляется им-

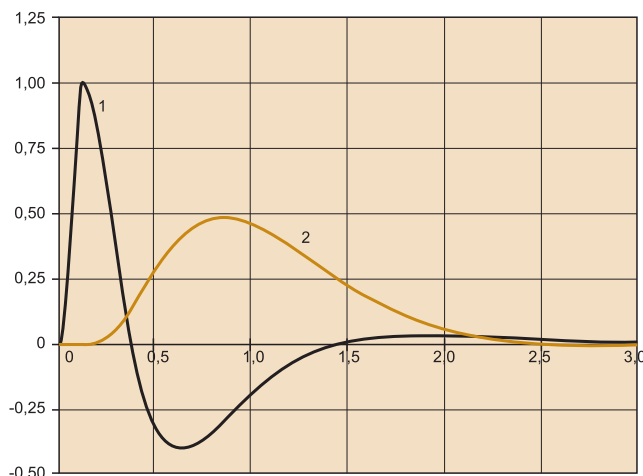


Рис. 4

пульсное воздействие на интегральную составляющую закона регулирования). Применение дискретной формы преобразования Фурье дает следующее значение вектора КЧХ системы: $(10) M(j; 1,257) = -0,154 + j0,048$. Соответственно формула (14) дает прежнее значение КЧХ объекта $W_{об}(j; 1,257) = 0,076e^{-j2,883}$.

Список литературы

1. Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Петров С.В. Настройка регуляторов по переходным характеристикам систем управления без их аппроксимации аналитическими выражениями // Автоматизация в промышленности. 2009. № 11.
2. Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Петров С.В. Алгоритмы и программы расчетов настройки ПИ и ПИД-регуляторов по переходным характеристикам // Автоматизация в промышленности. 2009. № 12.
3. Ротач В.Я. Расчет настроек промышленных автоматических регуляторов по динамическим характеристикам системы регулирования. Тр. МЭИ. Вып. 19. М-Л. Госэнергоиздат. 1957.
4. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. Госэнергоиздат. М-Л. 1961.
5. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. Энергия. 1973.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Изд. дом МЭИ. 2004, 2005, 2007.
7. Clarke D.W. The Application of Self-Tuning control // Trans. Inst. MC, Vol. 5. № 2. 1983.

Ротач Виталий Яковлевич — д-р техн. наук, проф.,

Кузицин Виктор Федорович — канд. техн. наук, доцент, Петров Сергей Викторович — инженер кафедры АСУ ТП Московского энергетического института (технического университета).

Контактный телефон (495) 362-70-29. E-mail: RotachVY@mpei.ru

БИБЛИОТЕКА

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РЫНКА СНГ В ОБЛАСТИ ПРОГРАММНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ И РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР СРЕДСТВ ДЛЯ КОНКРЕТНОГО ОБЪЕКТА

Под редакцией зав. лаб. методов автоматизации производства Института Проблем Управления РАН Э.Л. Ицковича.

Объективные описания, анализ и сопоставление важнейших показателей средств отечественных и зарубежных производителей в обзорах:

Выпуск 1. "Программы связи операторов с ПТК (SCADA-программы) на рынке СНГ", Версия 8, 2004 г.;

Выпуск 2. "Микропроцессорные программно-технические комплексы (ПТК) отечественных фирм", Версия 7, 2004 г.;

Выпуск 3. "Сетевые комплексы контроллеров зарубежных фирм на рынке СНГ", Версия 3, 2005 г.;

Выпуск 4. "Микропроцессорные распределенные системы управления на рынке СНГ", Версия 4. 2005 г.;

Выпуск 5. "Перспективные программные и технические средства автоматизации: их стандартизация, свойства, характеристики, эффективность эксплуатации", Версия 3, 2004 г.;

Конкурсный выбор средств и систем под конкретные требования:

"Методика проведения конкурса" с приложением программы "Вычисление общей ранжировки конкурсных заявок и анализ работы экспертов". Версия 2. 2004 г.

Справки по приобретению любой из перечисленных работ можно получить у Э.Л. Ицковича по тел. и факсу (495) 334-90-21, по E-mail: itskov@ipu.rssi.ru