

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Инженер Ю. С. ЯКОВЛЕВ

На правах рукописи

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УСТАВОК  
РЕЛЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С НЕЛИНЕЙНЫМ  
МЕХАНИЗМОМ

Активный <sup>кой</sup>рат диссертации на соискание ученой степени  
мамаи полож кандидата технических наук

Наличие  
мым, но не  
мышленность  
собность. А  
ладки и нас  
Научный руководитель доктор технических наук  
В. Д. МИРОНОВ.

Одним и  
его динамич  
мических  
строек рег  
ний орган  
ных парам  
статочно х  
требования

Что же  
т. е. опред  
определен  
ются с пом  
ристик. П  
(зона нечу

Москва, 1967 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматические регуляторы в настоящее время стали необходимой составной частью оборудования энергетической, металлургической, химической и других отраслей промышленности.

В ряде отраслей широкое распространение получили релейные регуляторы, включающие в себя электрические исполнительные механизмы постоянной скорости, управляемые контактными устройствами. Повышение требований к надежности средств автоматизации привело к созданию регуляторов с бесконтактным управлением исполнительными механизмами. Первыми промышленными бесконтактными регуляторами были регуляторы ЭАУС. В настоящее время, в связи с разработкой Государственной системы приборов (ГСП), бесконтактный принцип управления исполнительными механизмами положен в основу всех аналогичных регуляторов.

Наличие требуемого типа регулятора является необходимым, но недостаточным условием для автоматизации промышленности. Существенно также обеспечить их работоспособность. А это, в свою очередь, требует их правильной наладки и настройки.

Одним из основных этапов наладки регулятора является его динамическая настройка, состоящая из определения динамических характеристик регулируемого объекта, расчета настроек регулятора и определения его «уставок», т. е. положений органов управления, обеспечивающих получение расчетных параметров настройки. Методика первых двух шагов достаточно хорошо разработана и, в основном, удовлетворяет требованиям практики.

Что же касается реализации рассчитанных параметров, т. е. определения «уставок» регулятора, то здесь существуют определенные трудности. Обычно эти трудности преодолеваются с помощью соответствующих градуировочных характеристик. Построение последних для статических параметров (зона нечувствительности и др.) не представляет затрудне-

ний: Для динамических параметров эта задача более сложна и специфична. Рассмотрению этой специфики применительно к конкретным регуляторам посвящена значительная часть последующего материала.

Особенностью релейного регулятора является нелинейность некоторых его элементов. Наиболее существенные из них — нелинейность релейного элемента и, как это показывается в работе, нелинейность исполнительного механизма. Если первая детально изучена многими авторами, то нелинейность исполнительного механизма и ее влияние на работу автоматического регулятора до настоящего времени была изучена мало. С переходом к бесконтактным модификациям регуляторов влияние этой нелинейности усилилось. Необходимость учета ее влияния стала весьма актуальной.

Решение этой задачи потребовало исследования возможностей применения известных методов оценки динамических параметров регулятора и их пригодности для данного случая. В частности, использование наиболее простого и распространенного метода «характеристик разгона» в данном случае приводит к большим ошибкам. Применение универсального и подробно разработанного частотного метода затруднительно из-за его большой трудоемкости и необходимости в дорогой и сложной аппаратуре.

Более простым и доступным представляется излагаемый в работе метод, в основе которого лежит идея, предложенная кандидатом технических наук Н. И. Давыдовым. По своему содержанию — это метод временных характеристик, отличающийся от упомянутого метода «характеристик разгона» тем, что в качестве входного сигнала используется возмущение, изменяющееся не скачком, а по экспоненциальному закону. Работа выполнена в основном применительно к релейным регуляторам с электрическим исполнительным механизмом, не охваченным обратной связью, в частности к регуляторам ЭАУС и ГСП, разработанным СКБ ЭАУС совместно с ВТИ им. Дзержинского. Однако, полученные результаты могут быть распространены и на другие типы регуляторов аналогичной структуры.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка методики расчета уставок релейных регуляторов с нелинейным исполнительным механизмом, что, в свою очередь, потребовало:

— разработки доступного для использования в производственных условиях метода определения динамических пара-

метров релейных регуляторов с нелинейным исполнительным механизмом и необходимой для этого аппаратуры;

— исследования нагрузочных характеристик регулирующих органов.

Работа состоит из пяти глав.

В первой главе рассматриваются свойства электрического исполнительного механизма, как нелинейного звена регулятора, вводится понятие об импульсных характеристиках исполнительных механизмов. Дается обзор известных методов определения динамических параметров регуляторов.

Вторая глава посвящена теоретической разработке вопросов, связанных с практическим применением метода экспоненциальных возмущений для определения динамических параметров ПИ и ПИД-регуляторов.

В третьей главе описываются методика и результаты экспериментов, подтверждающих справедливость метода экспоненциальных возмущений для ПИ-регуляторов и возможность его применения для определения динамических параметров регуляторов с нелинейным исполнительным механизмом.

В четвертой главе рассматриваются вопросы, связанные с разработкой методики расчета уставок регуляторов, в том числе исследование нагрузочных характеристик регулирующих органов.

В пятой главе приводится описание разработанного в СКБ ЭАУС стенда для определения, методом экспоненциальных возмущений, динамических параметров регуляторов.

В приложениях даются:

— краткие сведения о регуляторах Чебоксарского завода электрических исполнительных механизмов;

— результаты экспериментальных исследований изменения длительности импульсов, формируемых регулирующим прибором РП1;

— методика определения нагрузочных характеристик регулирующих органов;

— каталог нагрузочных характеристик регулирующих органов, применяемых в энергетике;

— критерий качества динамических характеристик исполнительного устройства;

— сведения о проверке метода экспоненциальных возмущений, проведенной на реальных объектах регулирования.

### Нелинейность электрических исполнительных механизмов и методы определения динамических параметров регуляторов

Работа электродвигателя исполнительного механизма в импульсном режиме при сравнительно небольшой продолжительности управляющих импульсов (0,2—0,8 сек) обуславливает особенности динамики электрических исполнительных механизмов этого типа. Наиболее полно и всесторонне отражают динамические свойства исполнительного механизма (в комплекте с управляющим устройством) импульсная характеристика, под которой понимается график зависимости эквивалентной скорости  $S_{эkv}$  механизма от длительности  $t_u$  управляющих импульсов\*. Импульсные характеристики обычно определяются экспериментально.

Идеальный исполнительный механизм можно рассматривать как звено, входным сигналом которого является длительность управляющего импульса, выходным — угол поворота выходного вала механизма.

При воздействии на вход звена последовательности импульсов перемещение выходного вала определится интегралом:

$$\mu = \int \frac{1}{T_{ум}} \cdot \frac{t_u}{t_u + t_n} dt, \quad (1)$$

де:  $T_{ум}$  — время полного хода (т.е. поворота на  $90^\circ$  выходного вала) исполнительного механизма;

$t_n$  — длительность паузы между импульсами.

Поскольку обычно  $t_u \ll t_n$ , то при  $\frac{t_u}{t_n} = \text{const}$ , что имеет место при заданной настройке регулятора, можно считать, что

$$\mu = \frac{1}{T_{ум}} \cdot \frac{t_u}{t_n} t.$$

Если рассмотреть перемещение выходного вала за какой-то промежуток времени, например, за  $t = t_n$ , то получим:

$$\mu = \frac{1}{T_{ум}} \cdot \frac{t_n}{t_n} t_u = k_{ум} \cdot t_u. \quad (2)$$

\* Эквивалентная скорость  $S_{эkv}$  определяется как отношение перемещения  $\mu$  выходного вала, вызванного одним импульсом, к длительности  $t_u$  этого импульса.

Таким образом, у идеального исполнительного механизма выходной и входной сигналы связаны между собой линейной зависимостью. Импульсная характеристика идеального механизма представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс.

Для реального исполнительного механизма, в отличие от идеального, эквивалентная скорость не является постоянной величиной, а зависит от длительности управляющих импульсов. Следовательно, в этом случае имеет место нелинейная зависимость между выходной и входной величинами. Показателем наличия такой нелинейности у того или иного исполнительного механизма является нелинейность его импульсной характеристики.

Благодаря тому, что время  $T_{ум}$  исполнительного механизма зависит от величины его нагрузки, при расчете уставок регулятора необходимо учитывать нагрузочные характеристики регулирующих органов.

Известны три метода определения динамических параметров регуляторов: метод характеристик разгона, частотный метод и метод экспоненциальных возмущений. В первом случае динамические параметры вычисляются на основании обработки снятой экспериментально характеристики разгона регулятора.

При отработке регулятором пропорциональной части регулирующей прибор выдает импульс большой длительности, при отработке интегральной части — последовательность коротких импульсов.

Следовательно, причиной ошибок в определении динамических параметров регулятора этим методом является то, что оценка их производится на основании рассмотрения сигнала, образующегося на выходе нелинейного звена при различной величине сигнала на его входе.

Определение динамических параметров частотным методом дает возможность избежать указанной ошибки. Действительно, в этом случае на вход регулятора подается плавно меняющееся возмущение. При этом регулирующей прибор выдает импульсы, длительность которых меняется незначительно и, следовательно,  $S_{эkv}$  сохраняется неизменной. Однако, при всей универсальности частотного метода из-за большой его трудоемкости, сложности, высокой стоимости и дефицитности измерительной аппаратуры рекомендовать использование его в условиях серийного производства в настоящее время не представляется возможным.

Метод экспоненциальных возмущений является разновидностью временного метода, но в отличие от метода «скачка» в качестве возмущения используется сигнал, изменяющийся по экспоненте, т. е. плавно меняющийся сигнал. Это позволяет избежать ошибки, вызванной нелинейностью исполнительного механизма. Таким образом, метод экспоненциальных возмущений, являясь простым и доступным для применения в условиях производства, позволяет учесть рассматриваемую нелинейность регулятора.

Необходимо отметить также и методическую сторону вопроса. С достаточной достоверностью можно утверждать, что в условиях эксплуатации почти никогда не наблюдается скачкообразных возмущений. Как правило, возмущения изменяются плавно. Следовательно, при использовании для снятия градуировочных характеристик метода экспоненциальных возмущений регулятор при измерениях ставится в условия, наиболее близкие к условиям его эксплуатации.

Из изложенного следует, что практическое использование метода целесообразно только в том случае, если при работе регулятора длительность импульсов будет изменяться незначительно.

Из данных, приведенных в работах А. А. Славина\* и Н. И. Давыдова\*\*, а также из наших экспериментальных исследований можно заключить, что при достаточно глубоком скользящем режиме работы регулятора это условие выполняется.

## Глава II.

### Разработка метода экспоненциальных возмущений для определения динамических параметров релейных регуляторов

Для получения изменяющегося по экспоненциальному закону напряжения, воздействующего на вход регулятора, между входом его и источником скачкообразного напряжения вводится некоторое предвключенное звено. Для случая ПИ-регулятора это будет апериодическое RC звено с постоянной времени  $T_a$ .

\* Славин А. А. «Об одном виде несимметричных автоколебаний в релейной системе». Автоматика и телемеханика № 11, 1965 г.

\*\* Давыдов Н. И. «Динамические характеристики электронных регуляторов ВТИ», Диссертация, 1952 г.

Передаточная функция регулятора (если считать его идеальным) с предвключенным звеном будет следующей:

$$W_p(p) = \frac{1}{1+pT_a} \cdot K_p \cdot \frac{1+pT_u}{pT_u} \quad (3)$$

В простейшем случае, когда  $T_a = T_u$ , формула (3) примет вид:

$$W(p) = \frac{K_p}{pT_u} \quad (4)$$

При скачкообразном возмущении  $\sigma_0$  на входе предвключенного звена оригинал выходной функции регулятора будет иметь вид:

$$\mu(t) = \frac{K_p \sigma_0}{T_u} t \quad (5)$$

Графиком этой функции является прямая, выходящая из начала координат под углом  $\alpha$  к оси абсцисс, тангенс которого равен  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{K_p \sigma_0}{T_u}$ . Отсюда нетрудно определить динамические параметры ПИ-регулятора:

$$T_u = T_a; \quad K_p = \frac{T_u \mu}{\sigma_0 t} \quad (6)$$

В работе показывается, что в более общем случае, когда  $T_a \neq T_u$ , выходная функция регулятора будет иметь вид:

$$\mu(t) = \frac{K_p}{T_u} t + K_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_u}}\right) - K_p \frac{T_a}{T_u} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}}\right), \quad (7)$$

т. е. представлять собой сумму прямой и двух экспонент, которые при  $T_a = T_u$  компенсируют друг друга. При невыполнении этого равенства кривая  $\mu = f(t)$  будет изгибаться в ту или другую сторону, причем величина изгиба будет тем больше, чем больше будут различаться  $T_a$  и  $T_u$ . По величине этого изгиба можно определить значения поправок к  $K_p$  и  $T_u$ .

В работе аналитически выводится и обосновывается способ обработки экспериментально полученных кривых  $\mu = f(t)$ . В результате вывода получены расчетные формулы для вычисления динамических параметров ПИ-регуляторов:

$$T_u = T_a \frac{1 - 1,73 \frac{\Delta T}{T_a}}{1 + 0,47 \frac{\Delta T}{T_a}}, \quad (8)$$

Рекомендуется при экспериментальном определении выходной функции регулятора  $\mu = f(t)$  отношение  $\frac{T_d}{T_u}$  брать возможно меньше. При этом ошибка, вызванная отличием  $T_{дн}$  от  $T_d$  будет настолько малой, что ею можно пренебречь. Таким образом, случай, когда  $T_u^* \neq T_{ин}$  и  $T_d \neq T_{дн}$  сводится к первому случаю, когда  $T_u^* \neq T_{ин}$  и  $T_d = T_{дн}$ , для которого расчетные формулы были выведены ранее.

Полученная выше формула (5), строго говоря, справедлива только для линейных регуляторов. Поскольку регулирующие приборы рассматриваемых типов регуляторов содержат нелинейный элемент в виде трехпозиционного релейного звена, форма их выходной функции может отличаться от прямой (5). Для решения вопроса о возможности практического применения рассматриваемого метода необходимо оценить величину погрешности, даваемой методом, при измерении динамических параметров с указанного вида нелинейностью. В работе на основании аналитического рассмотрения процесса работы регулятора с трехпозиционным релейным элементом выводятся следующие формулы для вычисления интересных погрешностей:

$$\begin{aligned} \Delta T_u &\approx 100 \frac{\sigma_0}{U_0} \% \\ \Delta K_p &\approx 100 \frac{\sigma_0}{U_0} \% \end{aligned} \quad (17)$$

где:  $U_0$  — исходное напряжение заряда конденсатора обратной связи.

Эти формулы дают возможность определить величины скачкообразного сигнала (на входе предвключенного звена), при которых погрешности измерения  $K_p$  и  $T_u$  достаточно малы.

### Глава III.

#### Сравнение методов определения динамических параметров по переходным характеристикам в системе регулирования

Сделанные в предыдущих главах теоретические выводы показывают, что в системах регулирования, использующих рассматриваемые типы регуляторов, динамическую настройку последних следует производить, применяя градуировочные кривые, построенные с помощью метода экспоненциаль-

ных возмущений. Наиболее убедительный способ экспериментального подтверждения этих выводов состоит в сравнении переходных характеристик, снятых в некоторой системе регулирования при значениях динамических параметров регулятора, определенных различными способами.

Экспериментальная проверка была произведена в системе регулирования, составленной из моделей объекта регулирования, релейного ПИ-регулятора и исполнительного механизма с нелинейной импульсной характеристикой. Модели были выполнены с помощью моделирующей установки МН-7.

Кроме того, аналогичные исследования были проведены и в системе с реальным регулятором. Для этого был использован регулирующий прибор РПИ с исполнительным механизмом МЭО-10/40.

Для модели регулятора предварительно были построены градуировочные характеристики, причем для их построения динамические параметры определялись тремя различными способами: методом характеристик разгона, частотным методом и методом экспоненциальных возмущений. Как и следовало ожидать, градуировочные характеристики, снятые двумя последними методами, различаются мало.

При исследовании использовались несколько (16) моделей регулируемых объектов, различающихся постоянной времени  $T_{об}$ , величиной запаздывания  $\tau$  и отношением  $\frac{\tau}{T_{об}}$ . Каж-

дый объект состоял из трех включенных последовательно апериодических звеньев и блока чистого запаздывания. Возмущение в виде скачкообразного постоянного напряжения  $U_{возм}$  подавалось на один из входов первого апериодического звена. Обработка переходных процессов производилась следующим образом: для каждой из трех характеристик, снятых в системе с тем или иным объектом регулирования, вычислялся показатель качества  $\beta$ . Минимум его определял наилучший процесс регулирования. За показатель качества было принято произведение времени регулирования  $t_p$  в течение которого регулируемый параметр входит в заданную «трубку», на относительную величину первого отклонения.

Сравнение переходных характеристик, полученных в замкнутой системе автоматического регулирования, составленной из моделей релейного регулятора, исполнительного механизма с нелинейной импульсной характеристикой и моделей раз-

ной регулировки скорости связи «по фазам». Устанавливая соответствующие значения скорости связи по каждой фазе, можно скомпенсировать асимметрию коэффициента усиления, вызванную неуравновешенностью регулирующего органа. Указанный способ был проверен экспериментально.

Особенность расчета уставок ПИД-регулятора заключается в необходимости перехода от расчетных параметров  $K_p^*$ ,  $T_u^*$ ,  $T_o^*$  эквивалентного регулятора к параметрам  $K_p$ ,  $T_u$ ,  $T_d$ ,  $K_d$  реального регулятора. В работе выводятся формулы, определяющие соотношения между двумя этими группами параметров, а также даются рекомендации по выбору оптимальных соотношений между  $T_d$ ,  $T_u$ ,  $K_d$ ,  $K_u$ . Эти рекомендации получены на основании изучения переходных процессов, снятых в замкнутой системе с различными моделями объектов регулирования. Установлено, что при расчете уставок рассматриваемых типов ПИД-регуляторов следует отношение  $\frac{K_d}{K_u}$  устанавливать в пределах 4—5.

В последнем параграфе главы IV дается анализ погрешностей уставок коэффициента усиления регулятора и намечаются возможные направления их уменьшения.

## Глава V.

### Стенд для определения динамических параметров методом экспоненциальных возмущений

Практическое использование изложенных в работе выводов потребовало разработки специальной аппаратуры, отвечающей требованиям эксплуатации в условиях производства. Требования эти в основном сводятся к следующим:

1. Вся необходимая для измерений аппаратура, как основная, так и вспомогательная, по возможности должна быть сосредоточена на одном стенде.

2. Обслуживание стенда в процессе измерений должно быть простым, доступным работникам средней квалификации.

3. Обработка результатов измерений также должна быть несложной и не требующей много времени.

4. Конструкция стенда должна быть рассчитана на испытания регуляторов, выпускаемых на предприятии, для которого предназначен стенд. В данном случае имеются в виду регуляторы типа РП1 и РП2.

Основными узлами стенда являются: предвключенные звенья для ПИ и ПИД-регуляторов с регулируемыми параметрами, идеальный интегратор, заменяющий в необходимых

случаях реальный исполнительный механизм, регистрирующий прибор, ряд вспомогательных приборов и устройств.

В главе даются описания принципиальной схемы, конструкции стенда, рекомендации по его настройке и расчету уставок. Приводятся численные примеры расчетов. В СКБ ЭАУС были изготовлены опытные образцы стендов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что для реальных электрических исполнительных механизмов имеет место нелинейная зависимость между выходной и входной величинами. Признаком наличия этой нелинейности является нелинейность импульсной характеристики исполнительного механизма.

2. Наличие указанной нелинейности осложняет вопросы оптимальной настройки регулятора и требуют проверки пригодности известных методов измерения его динамических параметров. Показано, что распространенный метод характеристик разгона в данном случае дает большие ошибки. Лучшие результаты получаются при использовании метода гармонических или экспоненциальных возмущений.

3. Предложен и теоретически разработан способ обработки экспериментальных данных, выведены расчетные формулы, обеспечивающие возможность практического определения динамических параметров ПИ и ПИД-регуляторов методом экспоненциальных возмущений.

4. С помощью исследования переходных процессов в моделях систем автоматического регулирования, а также на реальных объектах произведена экспериментальная проверка сделанных теоретически выводов о целесообразности применения метода экспоненциальных возмущений.

5. Разработан стенд для определения динамических параметров регуляторов в производственных условиях и изготовлены опытные образцы.

6. Разработана методика определения нагрузочных характеристик регулирующих органов и способ обработки экспериментальных данных. Определены нагрузочные характеристики большого числа регулирующих органов, действующих на объектах энергетики, и составлен каталог нагрузочных характеристик наиболее широко применяемых типов регулирующих органов.

7. Предложен способ уменьшения влияния неуравновешенности регулирующих органов, работающих в комплекте с

Электрическими исполнительными механизмами, имеющими двухзначную импульсную характеристику.

8. Разработана методика расчета уставок рассматриваемых типов ПИ и ПИД-регуляторов.

### Перечень публикаций по теме.

1. Миронов В. Д., Оболенский Н. А., Яковлев Ю. С. «Бесконтактная система регулирования ЭАУС-У», изд. ЦБТИ Чув. СХХ, 1962 г.
  2. Жидков А. А., Яковлев Ю. С. «Динамические характеристики электрических исполнительных механизмов». Сборник: «Теория, расчет и принципы конструирования электронной агрегатной унифицированной системы». Изд. ОНТИПРИБОР, 1965 г.
  3. Яковлев Ю. С. «Способ определения динамических параметров ПИ-регуляторов по экспериментально снятым временным характеристикам при экспоненциальном возмущении». Сборник: «Теория, расчет и принципы конструирования электронной агрегатной унифицированной системы». Выпуск II, ОНТИПРИБОР, 1966 г.
  4. Жидков А. А., Миронов В. Д., Яковлев Ю. С., «О величине погрешностей измерения динамических параметров ПИ-регулятора при экспоненциальном входном сигнале». Там же.
  5. Яковлев Ю. С. «Определение динамических параметров ПИД-регуляторов ЭАУС временным методом при специальной форме входного сигнала». Там же.
  6. Васильев В. И., Яковлев Ю. С. «Стенд для определения динамических параметров регуляторов ЭАУС». Там же.
  7. Яковлев Ю. С. «Исследования динамических свойств П-регуляторов ЭАУС». Сборник «Теория, расчет и принципы конструирования электронной агрегатной унифицированной системы». ОНТИПРИБОР, 1965 г.
  8. Дорофеев Ф. М., Яковлев Ю. С. «Определение нагрузочных характеристик регулирующих органов». Энергетик № 11, 1966 г.
  9. Вдовцев Р. А., Яковлев Ю. С. «Об особенностях расчета настройки некоторых видов ПИД-регуляторов». Теплоэнергетика № 1, 1967 г.
-