

Компьютерная модель мощного транспортного дизель – генератора с электронной системой управления

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Вступление

Эффективность управления транспортным дизель-генератором однозначно определяется эффективностью расхода топлива.

В [1,2] показано, что существует определенная взаимосвязь частоты дизеля, положения рейки топливных насосов и коэффициента избытка воздуха α . Она может использоваться в качестве критерия для определения, например, такого темпа разгона системы, при котором сжигание топлива приводит к совершению полезной работы, а не к обогреву атмосферы. Однако для практического определения такой зависимости нужна либо физическая модель установки, либо компьютерная модель, так как широкий натурный эксперимент на действующем оборудовании мощностью 1МВт невозможен по экономическим, организационным и технологическим причинам. Поэтому задача построения компьютерной модели, которая была бы адекватна физической модели, а также применения полученной модели для проведения компьютерного эксперимента в указанных целях является актуальной.

Анализ публикаций

Разработка модели, в том числе и компьютерной, обычно состоит из трех этапов:

- разработка математической модели [3,4];
- построение и отладка компьютерной модели в одном из пакетов, например, в пакете структурного моделирования;
- проверка адекватности полученной модели при наличии данных о физическом эксперименте или хотя бы по контрольным точкам [5].

При таком порядке разработки чаще всего ставят задачу получения по возможности, более подробного описания объекта в дифференциальных и алгебраических уравнениях, что должно обеспечить наилучшее приближение рассчитанных процессов к натурным. Однако в этом случае, как правило, не удается определить значения параметров модели (постоянные времени, коэффициенты усиления, характеристики нелинейностей) хотя бы с точностью до 10...15%. В итоге результаты расчета по такой «полной» модели могут отличаться друг от друга (при вариации параметров в пределах указанного допуска) не только количественно, но даже и качественно. Поэтому в данной работе принят другой подход к построению адекватной модели, соответствующей задачам исследования.

В основу разработки модели положены следующие предпосылки:

- имеются в наличии динамические процессы – результаты натурального эксперимента, которые должны быть повторены в компьютерной модели с инженерной точностью;
- математическая модель установки должна быть максимально простой, так как по ней будет прослеживаться связь параметра α всего с двумя величинами: ходом рейки h и частотой дизеля n .

Остальные особенности динамических процессов для решения поставленных задач определяющего значения не имеют. Поэтому зазоры и малые

инерционности следует исключить из рассмотрения. Таким образом, математическая модель не должна копировать поведение всех конструктивных элементов, электромагнитные и тепловые процессы, но должна повторять поведение установки в физическом эксперименте.

Идентификация структуры и параметров элементов системы автоматического управления

Рассматриваемая система автоматического управления дизель-генератором изначально включает в себя следующие основные элементы:

- дизель-генератор как объект управления (ОУ);
- электронный блок (ЭБ), реализующий основные законы управления дизель-генераторов (ПИД закон управления, алгоритм оптимизации закона управления и т.д.);
- электромагнитное исполнительное устройство (актуатор) (ЭИУ), обеспечивающий перемещение плунжера, следящего гидроусилителя;
- следящий гидроусилитель (СГ), обеспечивающий перемещение реек топливного насоса;
- нагрузка на дизель: от генератора и собственные потери в дизеле;
- датчики: частоты вращения дизель-генератора и положения вала актуатора (нагрузка).

Структурная схема системы автоматического управления дизель-генератора (САУДГ) показана на рис.1.

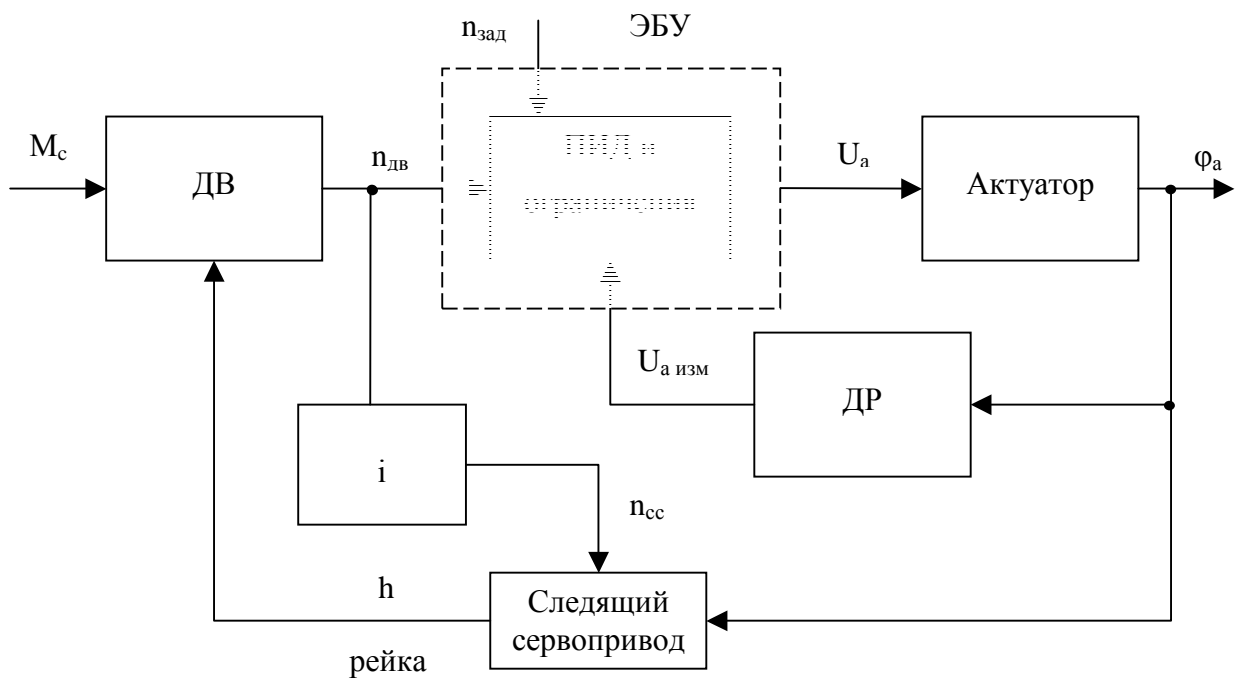


Рис.1. Структурная схема системы автоматического управления дизель-генератора (САУДГ)

- ДВ** – двигатель как объект регулирования; **ЭБУ** – электронный блок управления;
ДР – датчик положения угла поворота актуатора φ_a ;
i – блок передачи между двигателем и следящим сервоприводом (редуктор);
 $n_{дв}$ – частота вращения двигателя; $n_{зад}$ – заданная частота вращения двигателя;
 U_a – сигнал управления актуатором; $U_{a\text{ изм}}$ – сигнал обратной связи по углу φ_a ;
 φ_a – угол поворота вала актуатора; $n_{сс}$ – частота вращения следящего сервопривода;
h – положение рейки топливных насосов двигателя; M_c – нагрузка на двигатель

Имеются в наличии отдельные узлы САУДГ (актуатор, следящий гидроусилитель и др.) и оборудование для снятия их переходных функций и частотных характеристик для идентификации параметров.

Дизель-генератор как объект управления

Исходное уравнение движения дизель-генератора согласно [9] принято в виде:

$$J_{дг} \frac{d\omega}{dt} = M_{\partial} - M_{нагр.}, \quad (1)$$

где $J_{дг}$ – суммарный момент инерции дизеля и генератора;

ω – угловая частота вращения дизель-генератора;

M_{∂} – движущий момент дизеля;

$M_{нагр.}$ – момент нагрузки, определяемый генератором.

Учитывая принятых предпосылки и принимая $M_{\partial} = M_{\partial}(h)$ (h – положение реек топливных насосов, т.е. зависимостью M_{∂} от частоты вращения можно пренебречь), уравнение (1) можно привести к виду

$$J_{дг} \frac{dn}{dt} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{n_H}{n_H} = \left(\frac{\partial M_{\partial}}{\partial h} \right) \cdot (h - h_{xx}) \cdot \frac{h_H}{h_H} - M_{нагр.},$$

где n – частота вращения дизель-генератора;

n_H – номинальная частота вращения дизель-генератора;

h_H – номинальный ход реек.

После преобразований получаем

$$\frac{J_{дг} \cdot \omega_H}{n_H} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{M_{\partial H} \cdot (h - h_{xx})}{h_H} - M_{нагр.},$$

$$T_a \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{n_H}{h_H} \cdot [h - h_{xx} - h_{нагр.}],$$

$$T_a = \frac{J_{дг} \cdot \omega_H}{M_{\partial H}},$$

$$h_{НАГР.} = \frac{M_{нагр.}}{M_{\partial H}} \cdot h_H,$$

где ω_H – номинальная угловая частота вращения;

$M_{\partial H}$ – номинальный движущий момент дизеля ($M_{\partial H} = \left(\frac{\partial M_{\partial}}{\partial h} \right) \cdot h_H$);

h_{xx} – положение рейки, т.н. дизеля в режиме холостого хода.

Определение параметров модели нагрузки дизеля

Для определения $M_{нагр.}$ (или $h_{нагр.}$), а также h_{xx} снимали осциллограммы на физической модели – наиболее характерные эксплуатационные режимы, а именно:

- переходные процессы разгона – торможения дизель-генератора на холостом ходу при изменении позиций контроля;
 - сброс – наброс нагрузки на разных скоростных режимах.
- При этом на осциллограмме фиксировались изменения:
- частоты вращения дизель-генератора;
 - положения рейки топливных насосов (т.н.).

Для определения параметров блоков нагрузки необходимо обработать результаты эксперимента на физической модели. Нагрузку имитируют два блока: отдельно моделируется нагрузка в режиме холостого хода, отдельно - при полезном нагружении генератора.

Разгон и торможение осуществляются путём скачкообразного изменения задания частоты вращения в электронном блоке системы управления. При этом был включён алгоритмический модуль управления наклоном (темпом) изменения частоты.

На рис. 2 показаны осциллограммы натурального эксперимента по изменению скорости дизеля от максимальной до минимальной и обратно на холостом ходу.

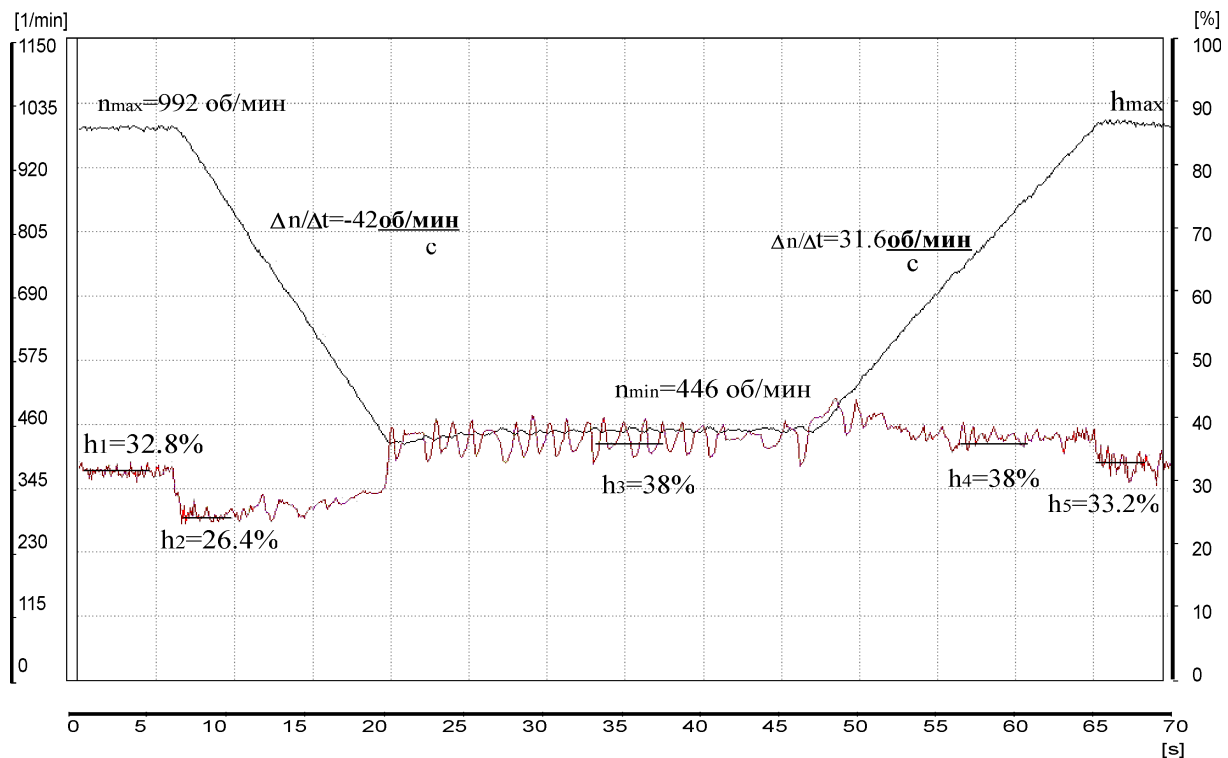


Рис. 2. Осциллограмма натурального эксперимента по изменению частоты дизеля от n_{max} до n_{min} и от n_{min} до n_{max} на холостом ходу

Из рис. 2 следует, что сопротивление вращению дизеля на холостом ходу при $n = n_{max}$ требует расхода топлива, соответствующего установлению рейки на уровне $h_1 = 32.8\%$ (до спада скорости) и $h_5 = 33.2\%$ (после нарастания). Поэтому примем среднее значение для положения рейки $h_{nmax} = 33\%$. При установившемся режиме вращения с минимальной частотой $h_{nmin} = 38\%$. Поэтому характеристика нагружения двигателя на холостом ходу соответствует заданной на рис.3 (в относительных единицах).

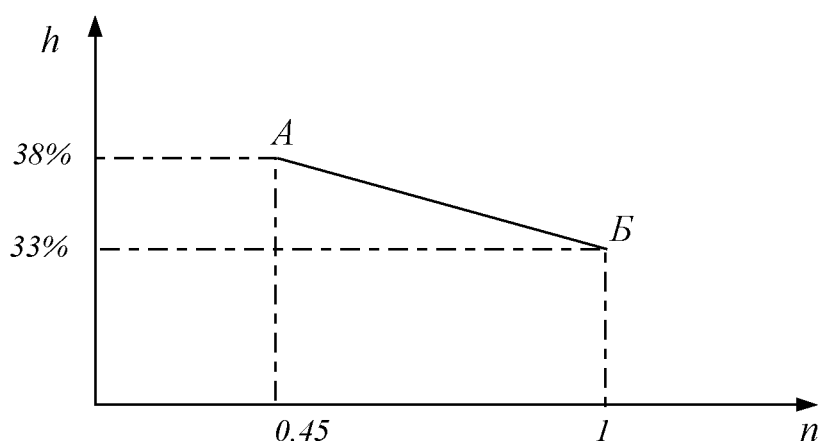


Рис. 3. Характеристика нагружения двигателя на холостом ходу

Рассчитанные точки А и Б соединим отрезком прямой, так как из рис. 2 видно, что при линейно убывающей частоте (что обеспечивается ПИД-регулятором) график изменения положения рейки h приблизительно линеен, а скачок значений h до $h_2 = 26.4\%$ и до $h_4 = 38\%$ объясняется необходимостью расхода топлива на разгон (h_4) и его экономии при торможении (h_2).

На рис. 4 показаны графики сброса нагрузки в натурном эксперименте и торможение от максимальной до минимальной частоты вращения. Здесь так же, как на рис. 2, хорошо просматривается линейный характер нарастания значений h положения рейки от точки А к точке Б (участок равномерного торможения). Разница Δh в начале торможения и в конце составляет

$$\Delta h = h_{2k} - h_{2H} = 28.7\% - 25\% = 3.7\%$$

и с инженерной точностью повторяет значение графика на рис. 3. Поскольку темп изменения частоты постоянный, а тормозной момент и положение рейки на участке АБ (рис.4) изменяются незначительно, значит, величина Δh обусловлена только потерями на трение.

На рис. 5 показаны осциллограммы натурального эксперимента по торможению установки под действием внешней нагрузки от максимальной частоты до минимальной с последующим разгоном. Поскольку моменты нагрузки от трения (холостой ход) и от полезной нагрузки суммируются на валу, наличие такого графика позволяет построить модель внешней нагрузки.

Так, из рис. 5 видно, что на той же полной скорости $n_{\max} = 992^{-1}$, но под нагрузкой рейка занимает положение $h_3 = 70\%$, в то время как на холостом ходу ее устанавливали на уровне $h = 33\%$. Значит, чисто внешняя для дизеля нагрузка при полной скорости перемещения на уровне

$$h_{n\max\text{нагр}} = 70\% - 33\% = 37\%.$$

На минимальной частоте аналогичный расчет приводит к значению

$$h_{n\min\text{нагр}} = 42.4\% - 38\% = 4.4\%.$$

Следовательно, основную нагрузку на минимальной частоте создает момент трения в самом дизеле.

На основе приведенных расчетов получим модель внешней нагрузки в виде, показанном на рис. 6. Здесь расчетные точки С и Д так же, как и ранее, соединены отрезком прямой. Это, очевидно, несколько огрубляет модель внешней нагрузки, которая, как видно из рис. 6, имеет небольшой прогиб параболического типа на участке разгона и торможения.

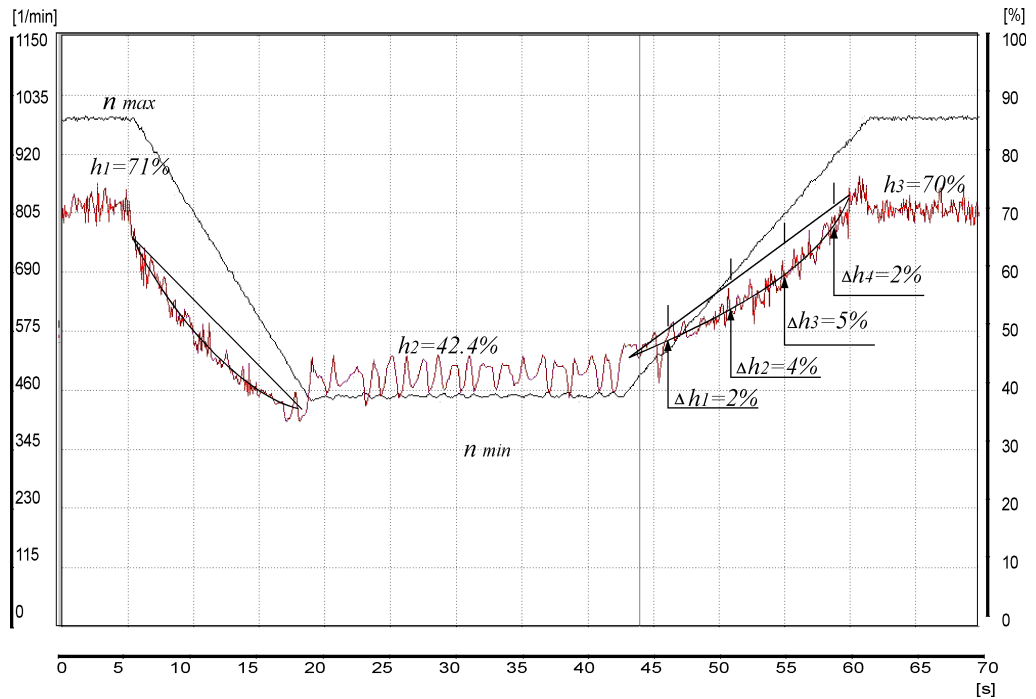


Рис. 4 Осциллограмма натурального эксперимента по торможению установки под действием внешней нагрузки от n_{max} до n_{min} с последующим разгоном

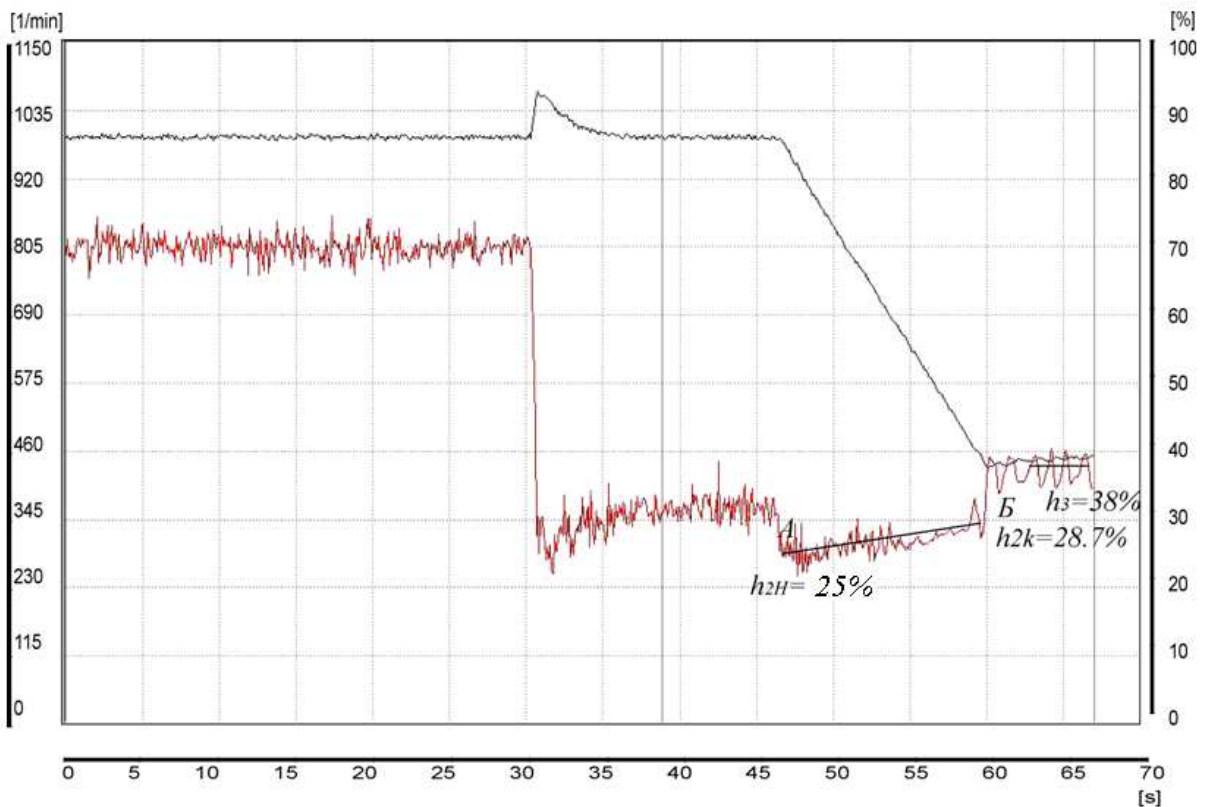


Рис.5 Графики сброса нагрузки в натурном эксперименте и торможение от n_{max} до n_{min}

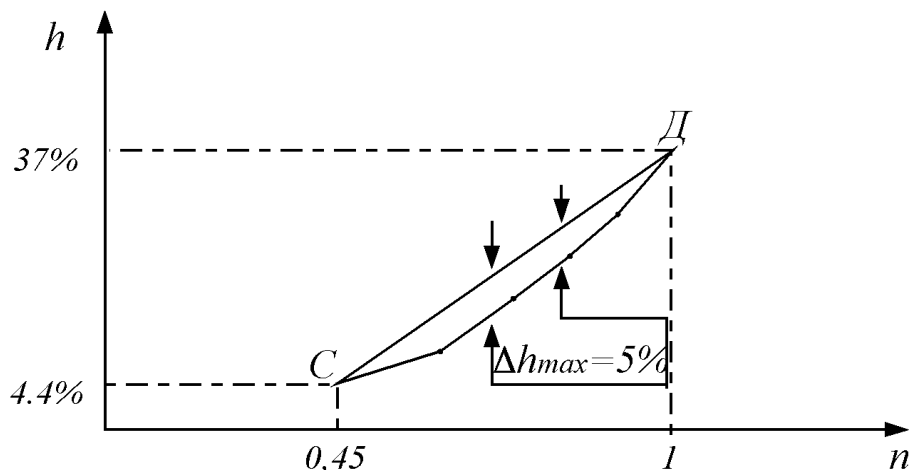


Рис.6. Модель нагрузки для нагруженного режима дизеля

Однако он невелик (не более $\Delta h = 5\%$) и не оказывает существенного воздействия на результаты эксперимента. Пунктирной линией показана кривая нагрузки, построенная с учетом малой нелинейности экспериментальной зависимости $h(n)$, которая была определена из осциллограммы на рис. 7 и 8. Графики, показанные на рис. 3 и 6, являются адекватными моделями нагрузки для холостого хода и для нагруженного режима дизеля, которые будут использованы в каждой модели.

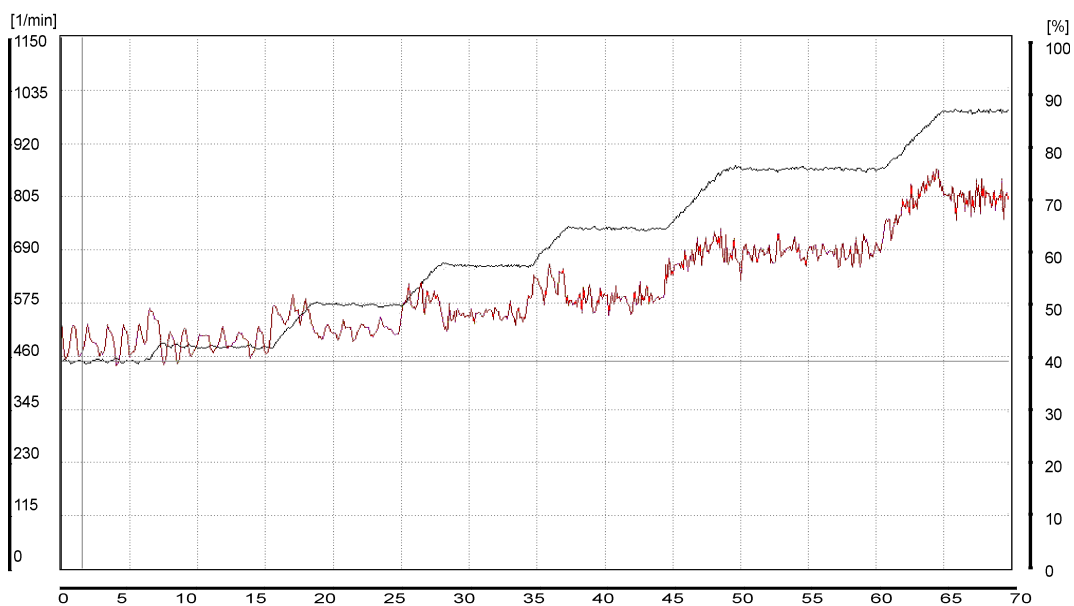


Рис. 7. Осциллограмма нарастания частоты вращения и нагрузки по разбивке контроллера частоты вращения

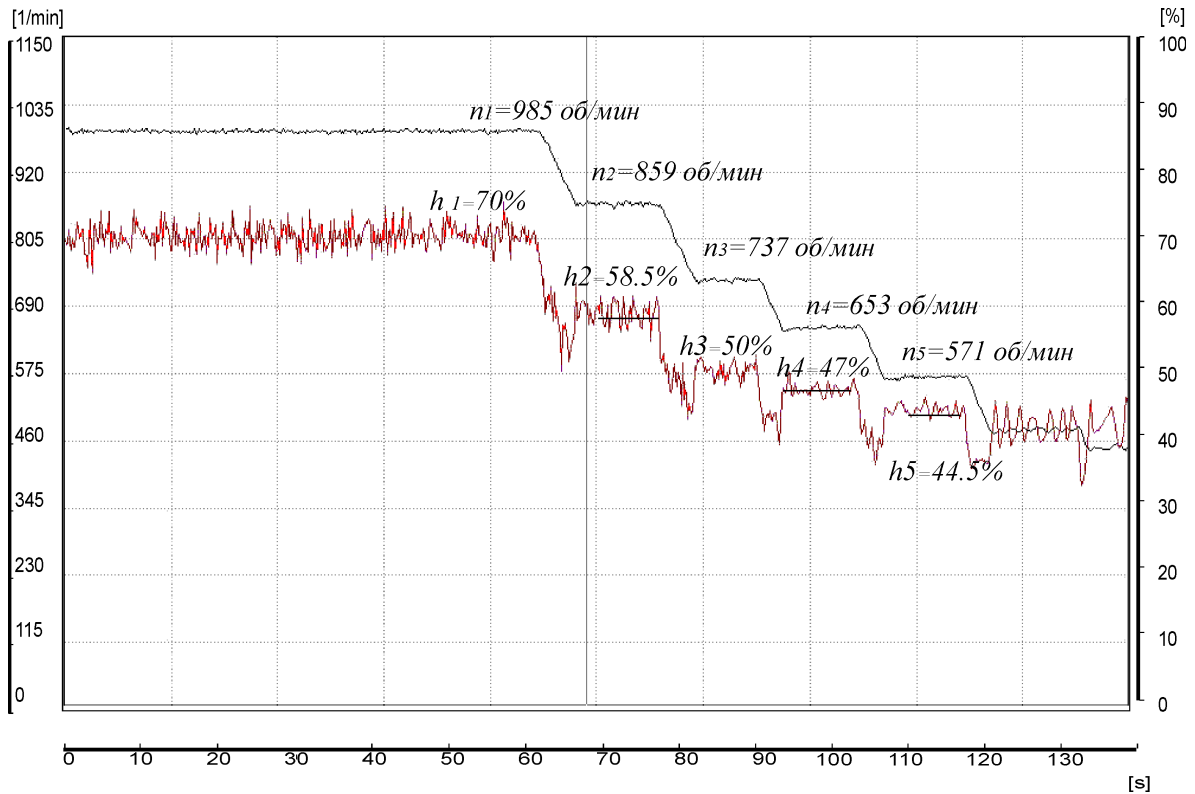


Рис. 8. Осциллограмма убывания частоты вращения и нагрузки по разбивке контроллера частоты вращения

Объединенный элемент «актуатор – следящий гидроусилитель»

В реальной системе управления участвует объединенный исполнительный механизм – «актуатор – следящий гидроусилитель», конструкция которого схематически показана на рис. 9.

Для определения структуры и параметров математической модели актуатора на комплексном моделирующем стенде были сняты следующие динамические процессы:

- переходные процессы изменения силы тока и поворота вала актуатора при ступенчатом изменении напряжения, подаваемого на обмотку управления;
- частотные характеристики изменения силы тока и поворота вала актуатора при подаче на обмотку управления напряжения, изменяющегося по синусоидальному закону с частотами от 2 до 10 Гц.

На пленке шлейфового осциллографа регистрировали ток в обмотке управления и перемещение вала электромагнитного актуатора (φ_a).

На основе полученных данных определены электрическая ($T_{\text{э}}$) и электромагнитная ($T_{\text{эм}}$) постоянные времени актуатора. Они составляют, соответственно: $T_{\text{э}} < 0.014\text{с}$, $T_{\text{эм}} = 0.036\text{с}$. Передаточная функция актуатора имеет вид

$$W(P) = \frac{K}{(T_{\text{э}} + 1)(T_{\text{эм}} + 1)}.$$

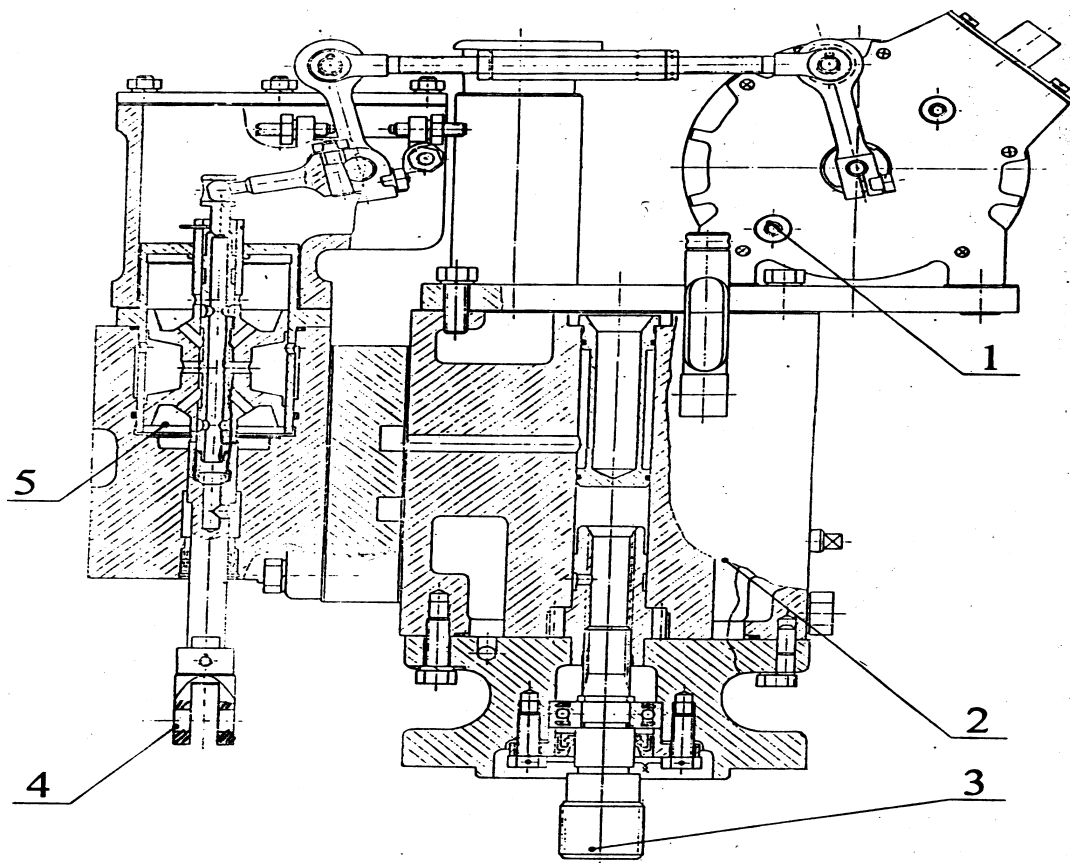


Рис. 9. Объединенный элемент «актуатор – следящий гидроусилитель»:

1 – актуатор; 2 – гидронасос; 3 – привод гидронасоса; 4 – шток; 5 – следящий сервомотор

Гидроусилитель представляет собой следящий сервомотор. Для определения структуры и параметров математической модели гидроусилителя снимались переходные процессы перемещения штока гидроусилителя при скачкообразном изменении положения вала актуатора (плунжера гидроусилителя).

Характерные осциллограммы показаны на рис. 10, а также в работе [6].

Следящий сервомотор представляет собой инерционное звено с постоянной времени T_c . Обработка осциллограмм позволило определить постоянную времени T_c – она составляет для сервомотора рассматриваемой САУ – $T_c=0,12$ с.

Дифференциальное уравнение, описывающее движение сервомотора имеет вид

$$0,12 \frac{dh_w}{dt} = S - h_w,$$

где h_w – перемещение штока сервомотора;

S – перемещение плунжера сервомотора (однозначно связанного рычажной системой с валом актуатора).

Осциллографирование переходных процессов перемещения штока гидроусилителя при управлении последним с помощью электрического актуатора показало идентичность полученных результатов тем, которые показаны на рис. 10, а также в [6].

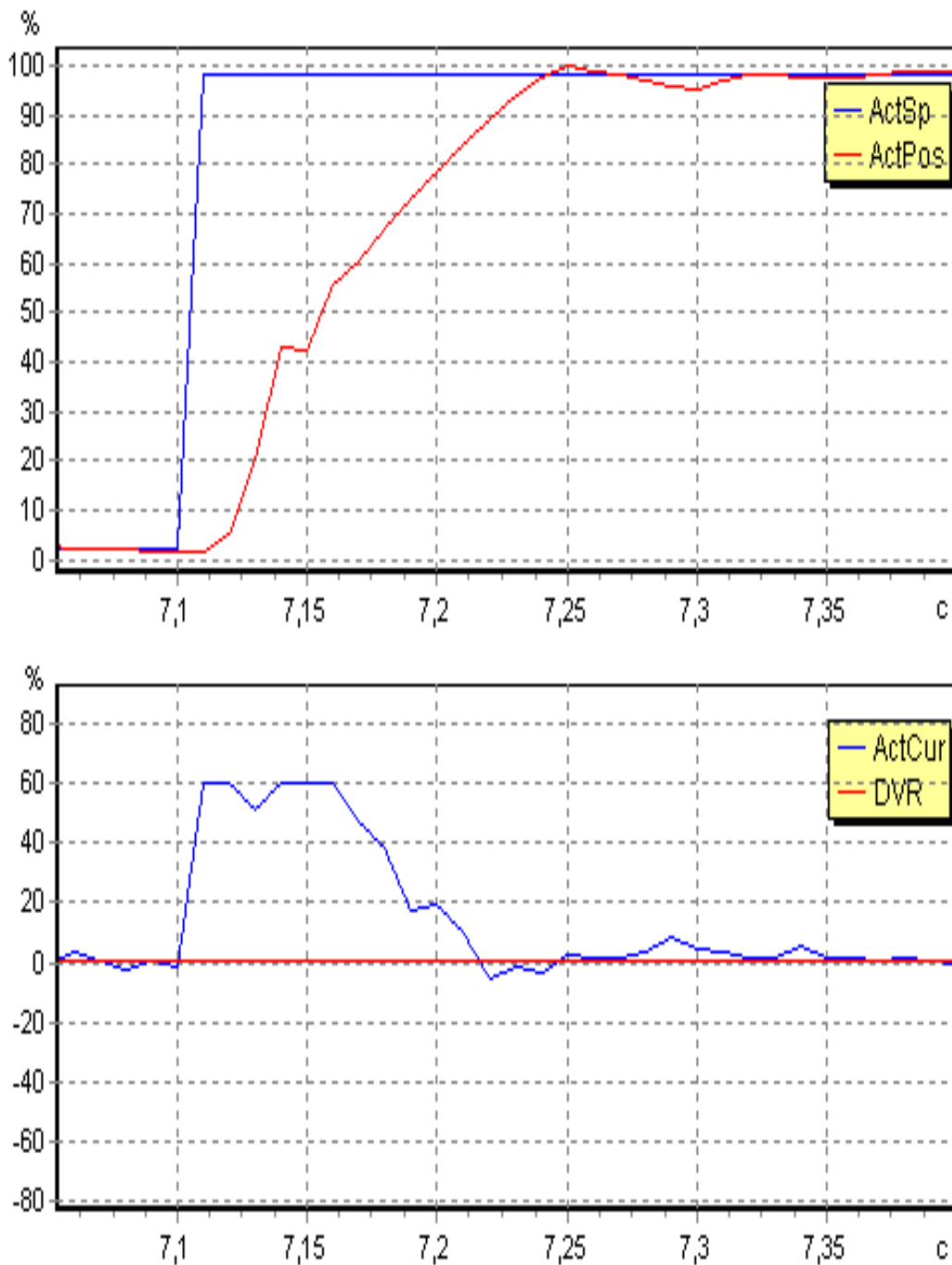


Рис. 10. Осциллограмма переходного процесса перемещения силового штока следящего сервопривода от положения «стоп» до положения «максимальная подача»

На этом основании можно сделать вывод о том, что в объединенном элементе «актуатор – следящий гидроусилитель» определяющими характеристиками являются характеристики гидроусилителя.

Поэтому в создаваемой модели будут учитываться параметры гидроусилителя, как определяющего звена в объединенном элементе «актуатор – следящий гидроусилитель».

Электронный блок и определение параметров ПИД-регулятора

Из рис. 4 видно, что при сбросе нагрузка ПИД-регулятор в нагрузочном эксперименте обеспечивала периодический процесс изменения скорости n и положения рейки h , который заканчивался приблизительно за 5 с.

Из графика на рис. 11 видно, что система ведет себя одинаково как при сбросе, так и при набросе нагрузки (в смысле качества переходных процессов).

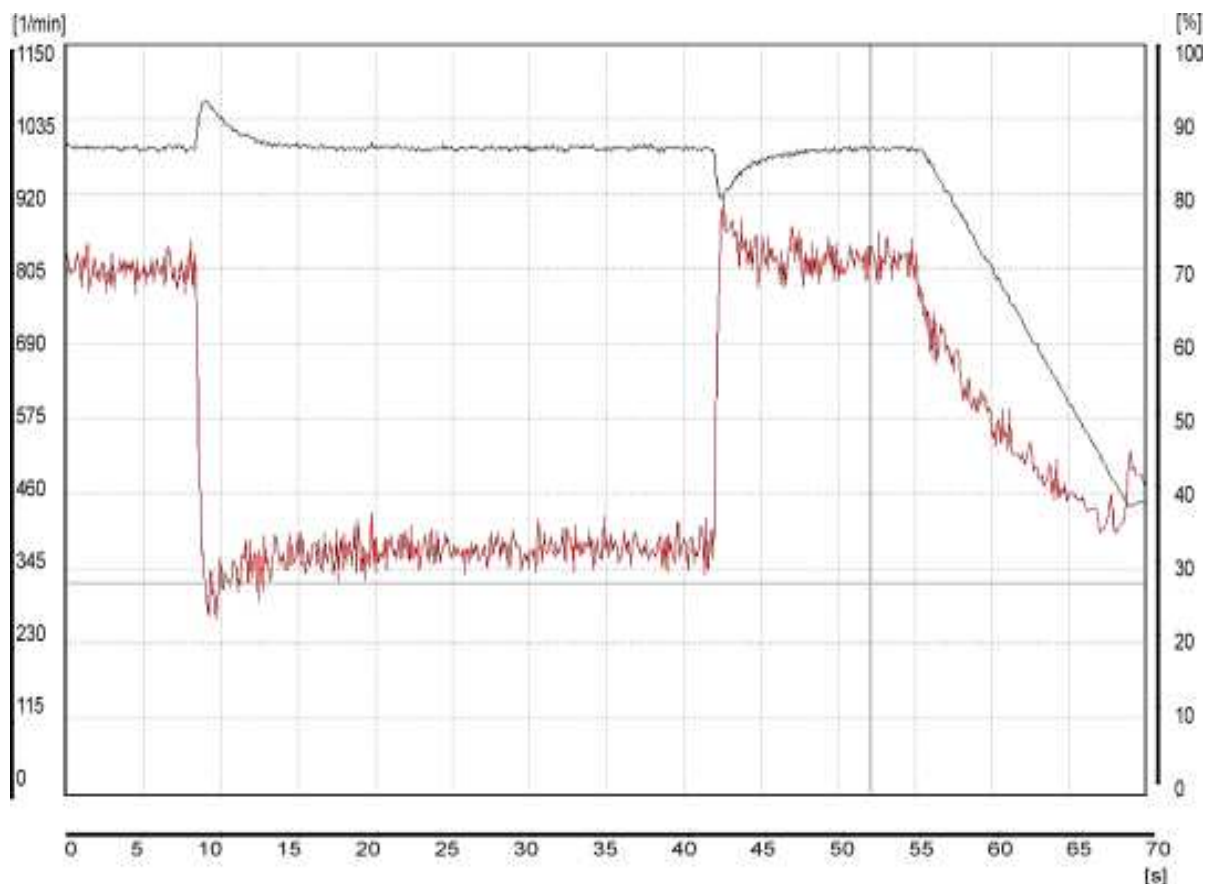


Рис. 11. Осциллограмма процессов при сбросе и набросе нагрузки

Поэтому можно сделать вывод о линейности установки в натурном эксперименте при соответствующей настройке ПИД-регулятора. Следовательно, для определения параметров регулятора в компьютерной модели достаточно решить задачу их отыскания при условии обеспечения аperiodического процесса с указанным быстродействием.

Такую задачу достаточно легко решают либо в частотной области с помощью методики синтеза регулятора по методу ЛАЧХ, либо корневыми методами с настройкой на биномиальное распределение корней.

На рис. 12 показана реализация ПИД-регулятора при параллельном соединении его звеньев.

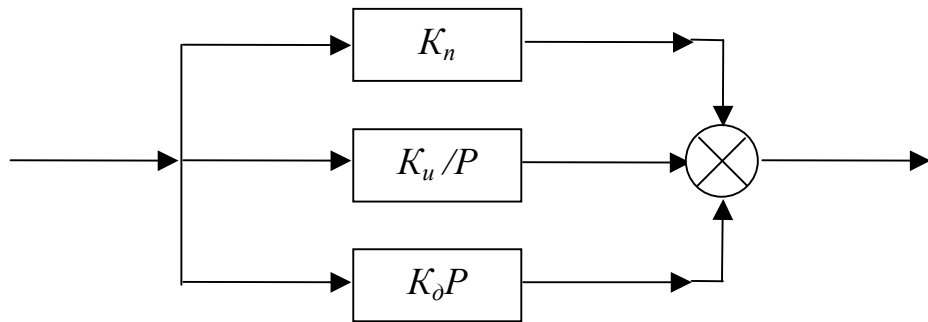


Рис.12. Реализация ПИД-регулятора при параллельном соединении его звеньев

После выполнения соответствующих расчетных процедур получены следующие значения коэффициентов ПИД-регулятора в относительных единицах:

$$k_n = 20 - 25\%$$

$$k_u = 6 - 8\%$$

$$k_d = 45 - 55\%$$

Следует отметить, что ПИД-регулятор можно построить как при параллельном соединении его звеньев (рис. 12), так и при последовательном, как показано на рис. 13.

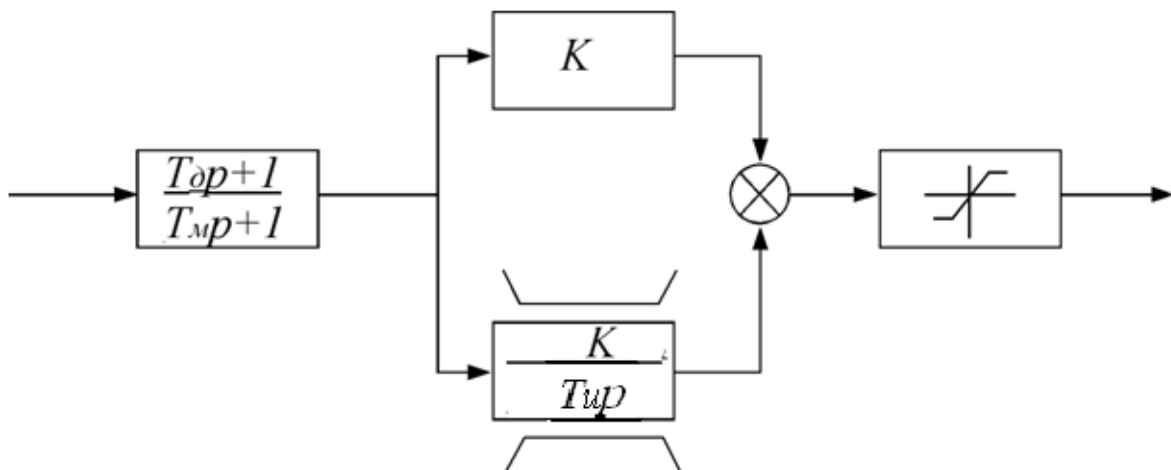


Рис. 13. Реализация ПИД-регулятора при последовательном соединении его звеньев

Здесь T_m - малая постоянная времени, которая искусственно вводится в модель регулятора для его реализуемости и практически не влияет на точность работы. Дифференцирующая T_d и интегрирующая T_u постоянные времени связаны с k_n, k_u, k_d следующими соотношениями:

$$k \cdot T_{\delta} = k_{\delta}$$

$$k(T_u + T_{\delta}) = k_n,$$

$$\frac{k}{T_u} = k_u$$

Практика дальнейших расчетов показала, что в линейной зоне обе реализации ПИД-регуляторов привели, естественно, к одинаковым процессам, но при выходе регуляторов на ограничение схема по рис. 13 приводит существенно к меньшему выбросу частоты (перерегулирование) в конце разгона до максимальной частоты.

С учетом указанных предпосылок в компьютерную модель включены всего четыре блока:

- блок, характеризующий инерционные свойства маховых масс вращающихся частей установки (интегратор с постоянной времени T_a);
- блок, характеризующий инерционные свойства рейки, перемещаемой сервоусилителем (тоже интегратор с постоянной времени T_u);
- ПИД-регулятор скорости, традиционный для рассматриваемой системы;
- блок, имитирующий механическую нагрузку, прикладываемую к дизелю нагруженного генератора.

Предложенная модель показана на рис. 14.

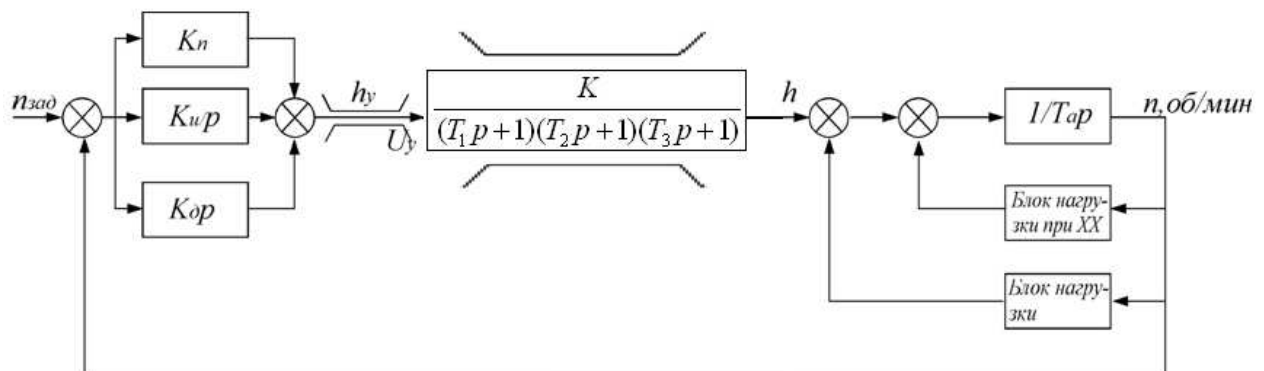


Рис. 14. Компьютерная модель тягового дизель-генератора

Анализ осциллограмм натурального эксперимента показал, что такого набора из четырех блоков достаточно для построения адекватной компьютерной модели, которую можно использовать для отыскания нужного темпа разгона установки.

Определим значение параметров модели.

Известно, что максимальный ход рейки в натурной установке равен $h_{max} = 25 \text{ мм}$, причем, если рейка стала на упор, то дизель разгоняется до скорости $n = 750 \text{ об/мин}$ за $\Delta t = 2,5 \text{ с}$. Так как в этом случае

$$h = h_{max} \frac{\Delta t}{T_a}, \tag{2}$$

$$\text{то } T_a = \frac{h_{max} \cdot \Delta t}{n} = \frac{25 \cdot 2.5}{750} = 0.0833 \frac{\text{мм} \cdot \text{с}}{\text{об} / \text{мин}}$$

Сохраним полученную внесистемную размерность для облегчения уточнения результатов моделирования.

Известно, что максимальный токовый сигнал на выходе ПИД-регулятора равен $U_{y_{max}} = 4.5 \text{ A}$, причем, когда он скачком устанавливается на этом уровне, перемещение рейки от $h = 0$ до $h = h_{max} = 25 \text{ мм}$ происходит за $0,15 \dots 0,2 \text{ с}$. Поэтому, аналогично (2)

$$h = U_{y_{max}} \frac{\Delta t}{T_u}, \quad (3)$$

отсюда

$$T_u = \frac{\Delta t \cdot U_{y_{max}}}{h_{max}} = \frac{4.5 \cdot 0.2}{25} = 0.036 \frac{\text{A} \cdot \text{с}}{\text{мм}}$$

Компьютерные модели дизель-генератора с непрерывным и цифровым ПИД-регулятором

Для построения компьютерных моделей использован пакет *Matlab+Simulink*, являющийся одним из основных пакетов моделирования в университетах всего мира [7,8]. Разработанная схема модели с цифровым ПИД-регулятором (PID_DISKRET) показана на рис. 15. Она включает в себя модель АЦП с квантованием по уровню и по времени, а также три параллельные ветви регулятора – П, И и Д составляющих. Д (дифференциальная) составляющая определяется как разность между текущим и предыдущим значениями входного сигнала регулятора, деленная на T_0 – период квантования. Аналого-цифровой преобразователь физически введен в канал обратной связи по частоте, а в представленной модели перенесен к регулятору. Так как его разрядность в натурной установке составляла 12 и 16, то он не оказывает никакого влияния на качество процессов в системе регулирования. Период дискретности вычислений в микропроцессорной системе регулирования натурной установки составляет $T_0 = 0.01 \text{ с}$.

Интегральную составляющую определяют по методу трапеций (передаточная функция $W(z) = T_0 \cdot (1+z^{-1}) / (2 \cdot (1-z^{-1}))$). Этот метод обладает меньшей погрешностью, чем метод прямоугольников (метод Эйлера). Процесс квантования моделируется с помощью звена “zero-order hold”-схема выборки-хранения. Процессы регулирования в системе относительно медленные, и полное время регулирования составляет около 5 с (см. рис. 2 и 4). При таком периоде дискретности T_0 отличия между динамическими процессами в цифровой и аналоговой моделях в графиках на экране компьютера не просматриваются.

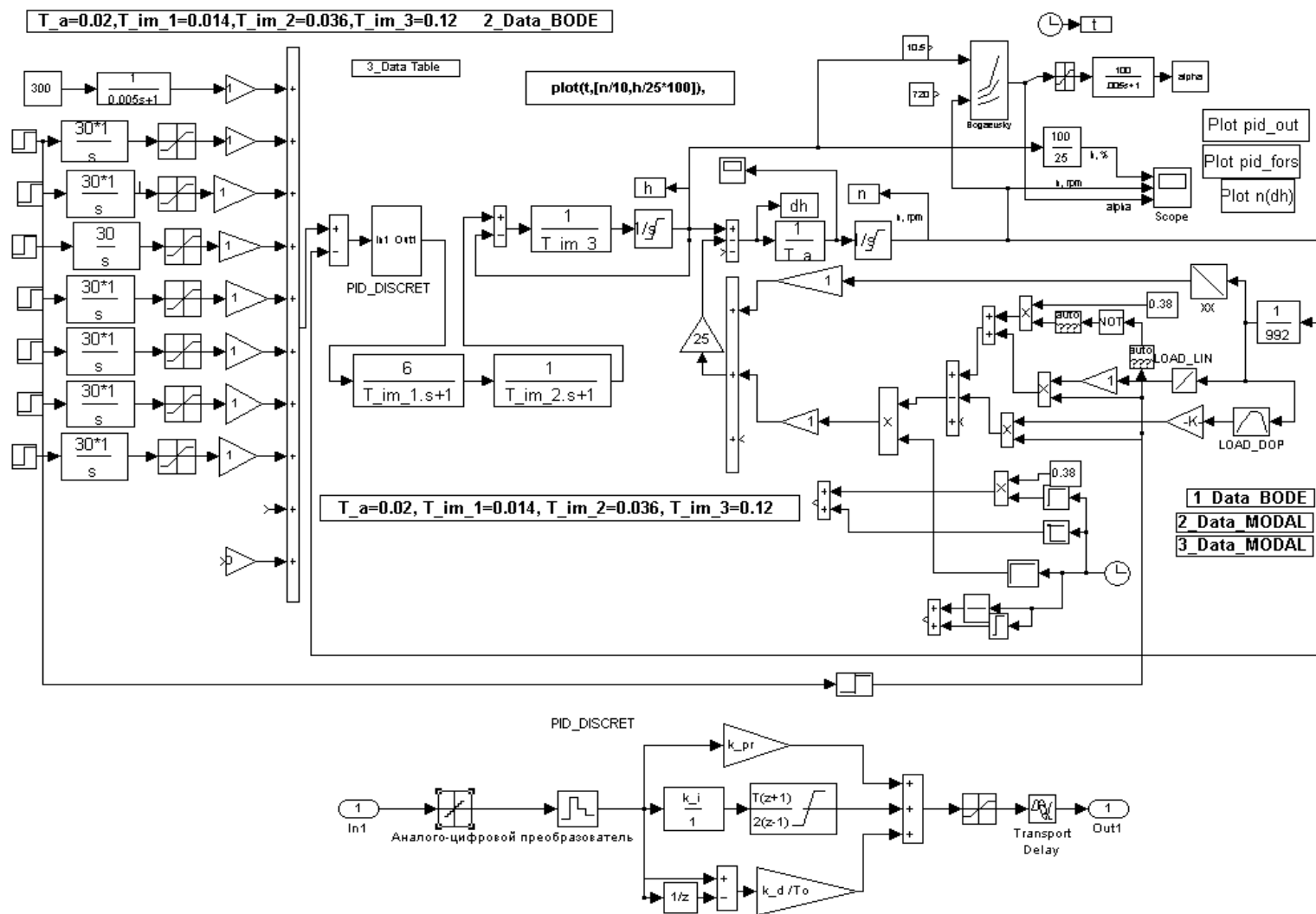


Рис. 15. Схема компьютерной модели с цифровым ПИД-регулятором

В каналах дифференцирования и интегрирования использованы звенья чистого запаздывания на один такт повторения вычислений T_0 , обозначенные как z^{-1} . На выходе регулятора установлен блок ограничения выходного сигнала, который моделирует ограничение разрядной сетки ЭВМ (в случае аналоговой схемы это - ограничение по питанию усилителя). В вычислительный алгоритм самого интегратора также встроен блок ограничения, что отражено на рисунке блока интегратора. Это ограничение необходимо для предотвращения перехода системы регулирования в автоколебательный режим при длительном снижении и медленном восстановлении скорости

Коэффициенты настройки цифрового ПИД-регулятора были приняты равными коэффициентам аналогового прототипа в соответствии с общепринятой методикой.

Кроме того, был выполнен синтез цифрового ПИД-регулятора, обеспечивающего апериодические процессы в системе путем использования корневых методов синтеза. Настройка проводилась на распределение корней дискретизированного стандартного биномиального распределения. Интеграторы объекта регулирования также были дискретизированы в ходе синтеза. Удалось получить аналитические зависимости для расчета параметров цифрового ПИД-регулятора в функции периода квантования T_0 , что облегчает процедуру подстройки системы при необходимости увеличения значений T_0 [10,11].

В обоих случаях настройки цифрового ПИД-регулятора (по аналоговому прототипу и корневой методике) были получены удовлетворительные результаты на компьютерной модели в смысле совпадения с натурными осциллограммами.

Результаты компьютерного моделирования транспортной дизель-генераторной установки

Расчет динамических режимов по схеме рис. 15 был выполнен так, чтобы их можно было сопоставить с натурными осциллограммами, положенными в основу модели.

Результаты расчета показали хорошее совпадение натуральных и компьютерных осциллограмм. Соответствующие графики показаны на рис. 16 -21. Процессы на рис. 16 соответствуют процессам на рис. 2; рис. 17- процессам на рис. 4; рис. 18 - процессам на рис. 5; рис. 19 - процессам на рис. 7; рис. 20 - процессам на рис. 8; рис. 21 - процессам на рис. 11.

Выводы

Таким образом, приведенные выше материалы свидетельствуют о том, что построена адекватная физической установке компьютерная модель, которая может быть использована в дальнейшем для проведения нужного компьютерного эксперимента по определению наиболее эффективных, с точки зрения расхода топлива, динамических режимов разгона и торможения мощной транспортной дизель-генераторной установки.

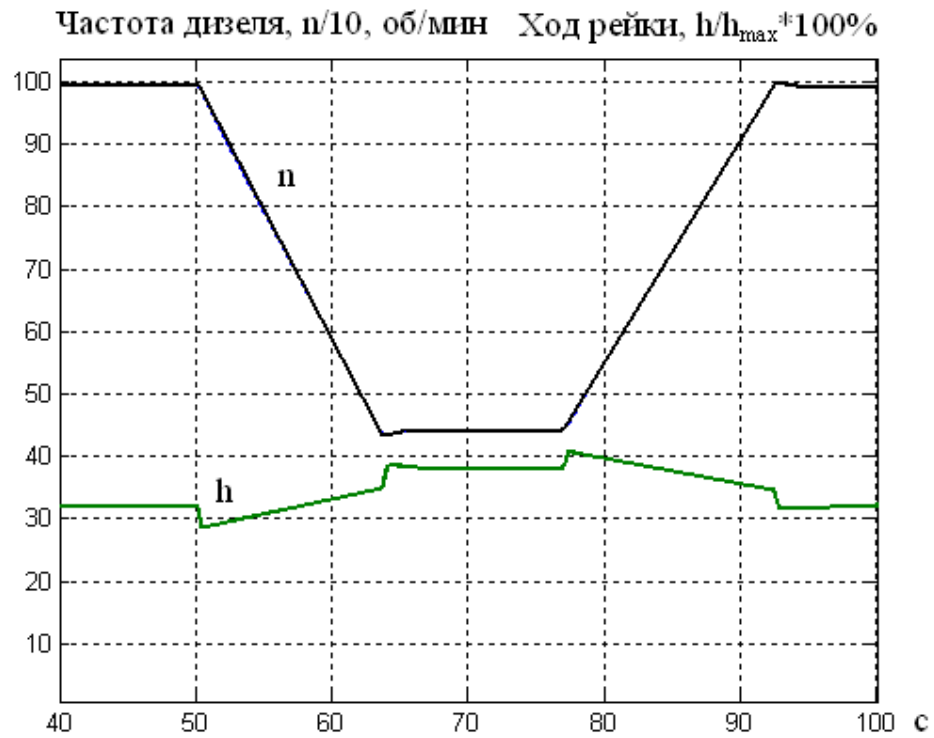


Рис. 16. Компьютерные графики изменения частоты дизеля от max до min и от min до max на холостом ходу

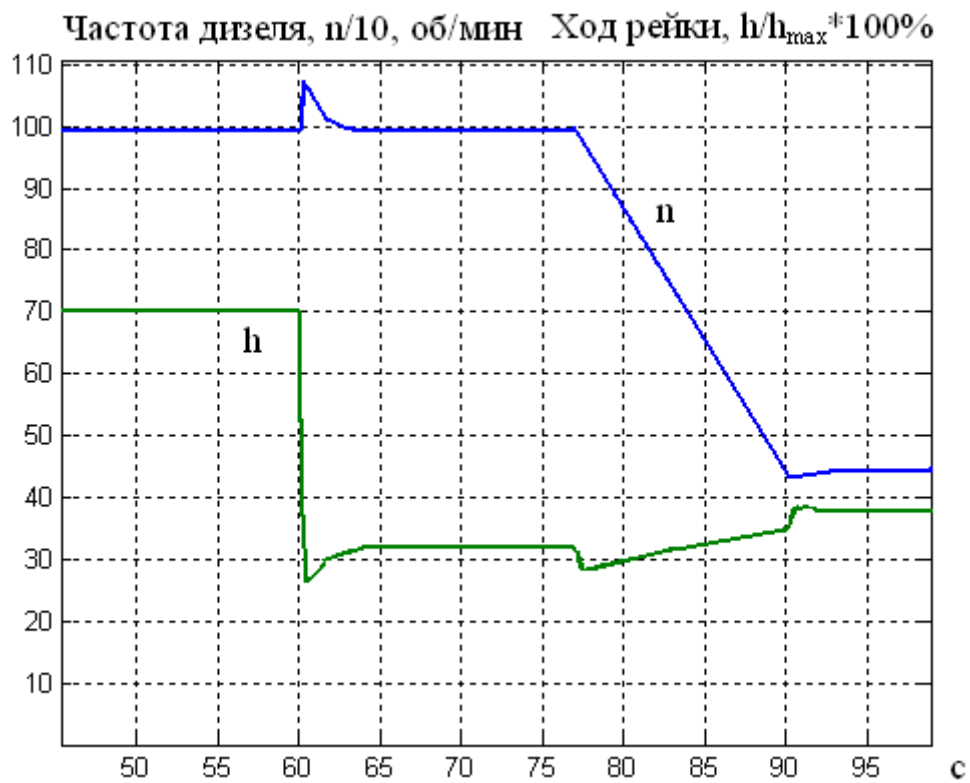


Рис. 17. Компьютерные графики сброса нагрузки и торможения от n_{\max} до n_{\min}

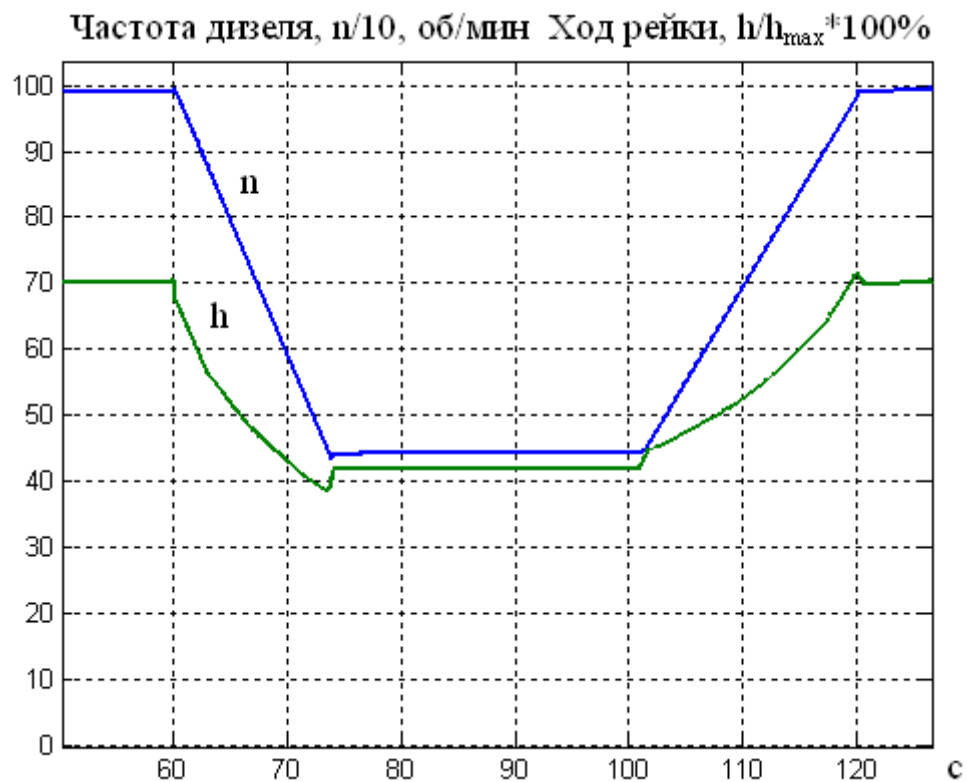


Рис. 18. Компьютерные графики торможения установки под действием внешней нагрузки от n_{\max} до n_{\min} с последующим разгоном

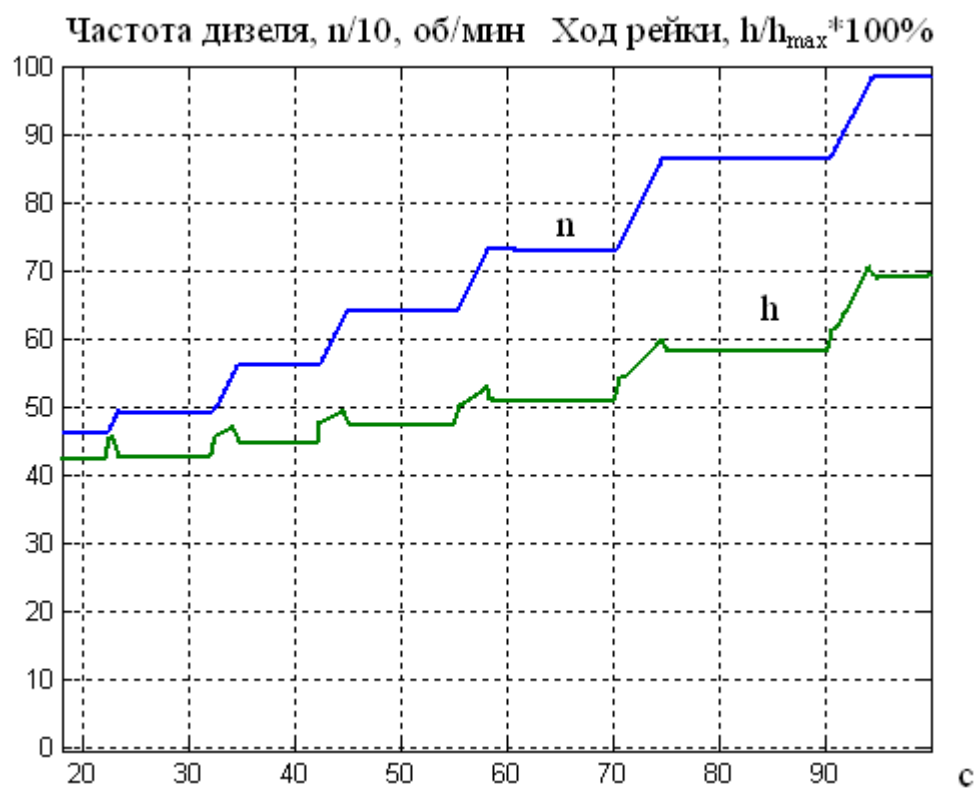


Рис. 19. Компьютерные графики нарастания частоты вращения и нагрузки по разбивке контроллера частоты вращения

Частота дизеля, $n/10$, об/мин Ход рейки, $h/h_{max} * 100\%$

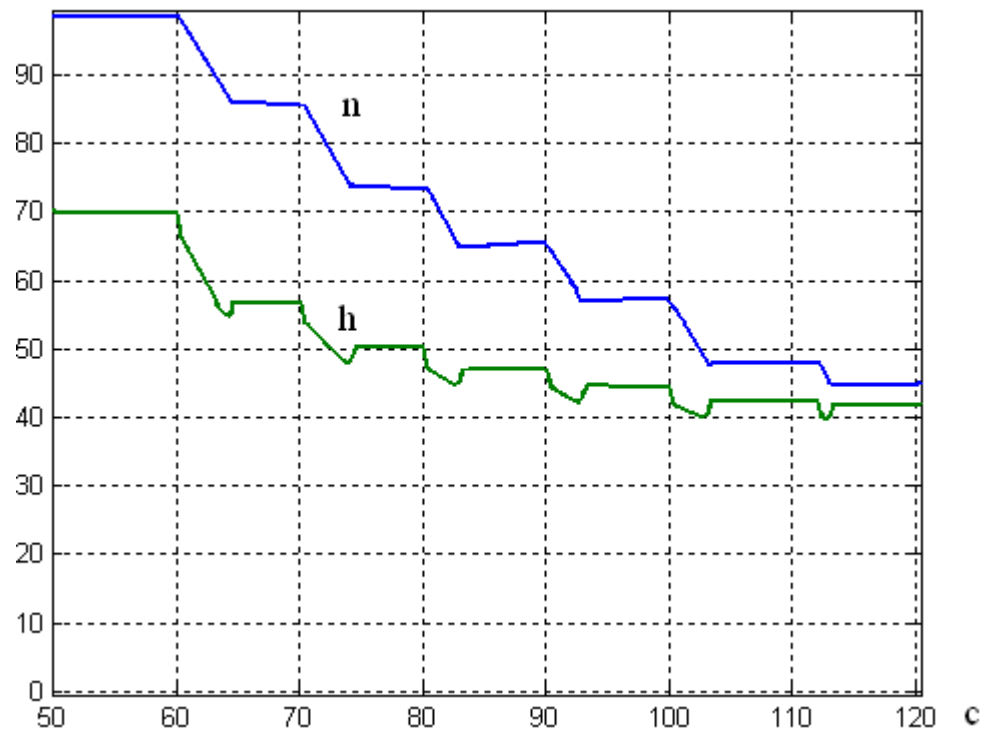


Рис. 20. Компьютерные графики убывания частоты вращения и нагрузки по разбивке контроллера частоты вращения

Частота дизеля, $n/10$, об/мин Ход рейки, $h/h_{max} * 100\%$

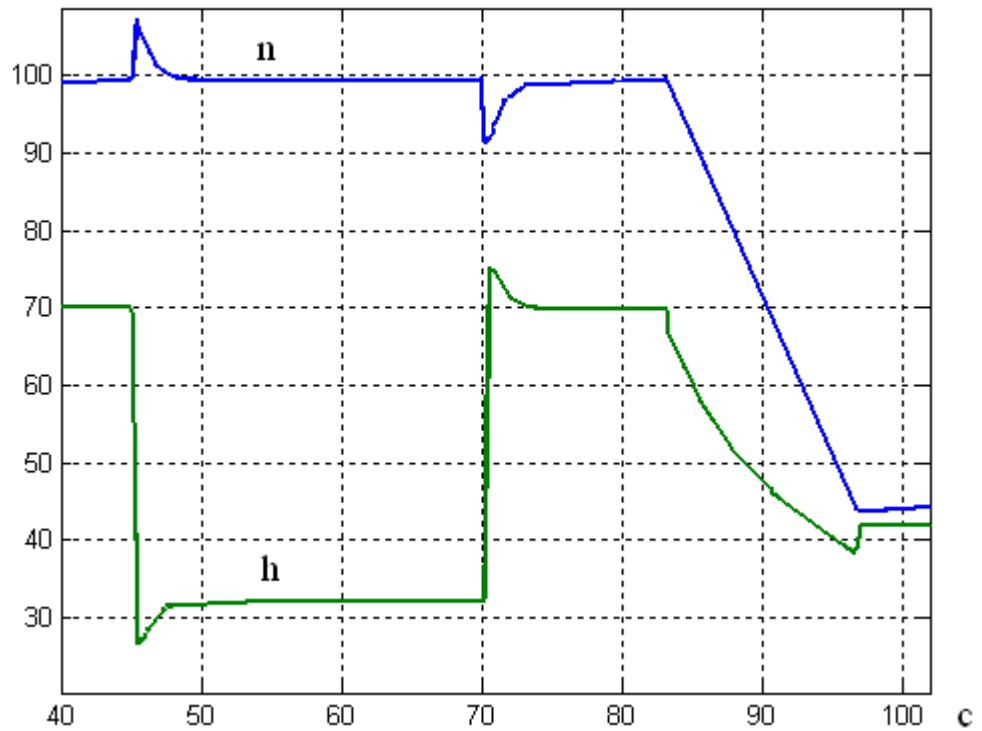


Рис. 21. Компьютерные графики процессов при сбросе и набросе нагрузки

Список литературы

1. Богаевский А.Б., Смирнов О.П. Использование сеточных моделей при определении оптимального закона управления нагружения силового агрегата дизель-поезда// Сб. науч. трудов «Автомоб. транспорт», вып.15 , г. Харьков: РИО ХНАДУ, 2004 г. с. 86-89.
2. Богаевский А.Б. Метод определения оптимальных характеристик нагружения для микроконтроллерных регуляторов транспортных дизель-электрических установок// Праці Луганського відділення Міжнарод. акад. інформатизації. Науч. журн. №2, 2004.-с. 52-55.
3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1972. - 768 с.
4. Бесекерский В.А., Изранцов В.В. Системы автоматического управления с микроЭВМ. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1987. - 320 с.
5. Володин А.И. Моделирование на ЭВМ работы тепловозных дизелей. - М.: Транспорт, 1985, - 216 с.
6. Басов А.В., Буряковский С.Г., Алехин С.А., Казаковский А.О. Определение допустимых значений параметров объекта регулирования электронного регулятора СУДМ-01 тепловозных дизель-генераторов с электрогидравлическим исполнительным механизмом типа ТЭ. // Вестник НТУ «ХПИ». - Харьков: НТУ ХПИ, 2005, № 45.- с. 373 – 375.
7. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ: Справочник. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1989. - 240 с.
8. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В., Круглов В.В. MATLAB 5.3.1 с пакетами расширений. Под ред. проф. Дьяконова В.П. – М.: Нолидж, 2001. – 880 с.
9. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. – М.: Машиностроение, 1978. – 472 с.
10. Клепиков В.Б., Осичев А.В., Абдульмалек Д.С. Корневой метод синтеза ПИ - регулятора тока и скорости одномассовой системы подчиненного регулирования с нагрузкой типа линейного вязкого трения // Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков, Основа, 1997, с. 299–302.
11. Осичев А.В., Котляров В.О., Марков В.С. Стандартные распределения корней в задачах синтеза в электроприводе// Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков, Основа, 1997, с. 104 – 110.