

## Двухконтурная система стабилизации (регулирования) частоты вращения генераторного агрегата с компенсирующей связью по активному току нагрузки

Хватов О. С., доктор техн. наук, Коробко И. Г., Лебедев В. В., инженеры

**ФБОУ ВПО “Волжская государственная академия водного транспорта”,  
Нижний Новгород**

Дарьенков А. Б., канд. техн. наук

**ФГБОУ “Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева”**

Рассмотрены вопросы поддержания частоты вращения дизель-генераторного агрегата. Проведен анализ двухконтурной системы ее стабилизации с подчиненным контуром регулирования положения топливной рейки дизеля. Построена модель регулятора частоты вращения дизель-генераторного агрегата и выполнен выбор его оптимальных параметров. Представлены результаты моделирования работы регулятора в различных режимах.

**Ключевые слова:** система стабилизации, регулятор частоты вращения, подчиненное регулирование, динамический режим, компьютерная модель.

Современные генераторные агрегаты (дизельные, бензиновые, газопоршневые) оснащаются электронным регулятором частоты вращения, который через усилитель мощности управляет работой актуатора. Последний в свою очередь регулирует подачу топлива в приводной двигатель, изменяя тем самым момент на его валу и частоту вращения агрегата. Такая замкнутая система регулирования обеспечивает поддержание постоянства частоты вращения генераторного агрегата (с целью стабилизации частоты вырабатываемого напряжения) либо ее регулирование по определенному закону [1].

Существующие системы стабилизации частоты вращения отличаются как по принципу построения (цифровые, аналоговые, гибридные), так и по структуре. В последнее время наиболее распространены цифровые системы, в которых с помощью импульсного датчика получают информацию о частоте вращения генераторного агрегата. В большинстве случаев

применяется одноконтурная система регулирования с ПИД-регулятором частоты вращения. Однако в связи с ужесточением требований к точности поддержания частоты вращения, особенно в динамических режимах, появились двухконтурные системы, использующие принцип подчиненного регулирования. В них внешним остается контур регулирования частоты вращения, а внутренний замкнутый контур регулирует положение топливной рейки, жестко связанное с углом поворота вала актуатора (в качестве сигнала обратной связи в этом контуре используется информация, снимаемая с датчика угла поворота вала актуатора).

На рис. 1 показана структурная схема актуатора. Электромагнитная часть представлена апериодическим звеном с коэффициентом  $k_M$  и электромагнитной постоянной времени  $T_3$ . На вход звена поступает сигнал, равный разности напряжения возбуждения  $U_B$  и противоЭДС  $E$ , определяемой скоростью поворо-

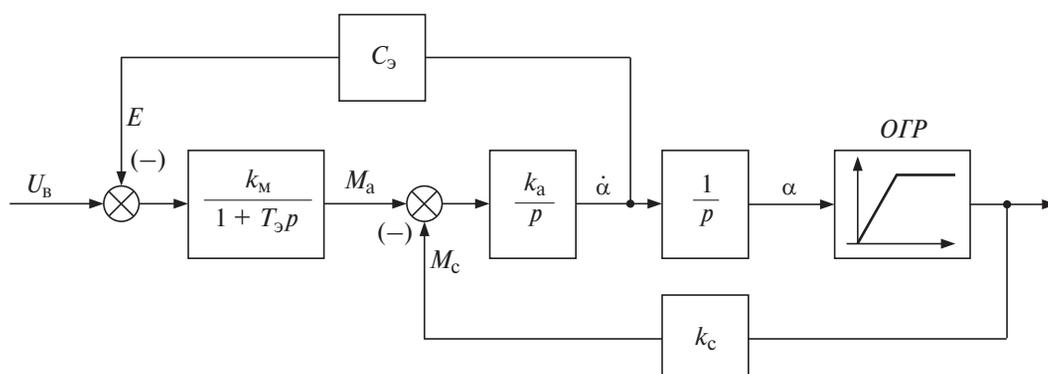


Рис. 1

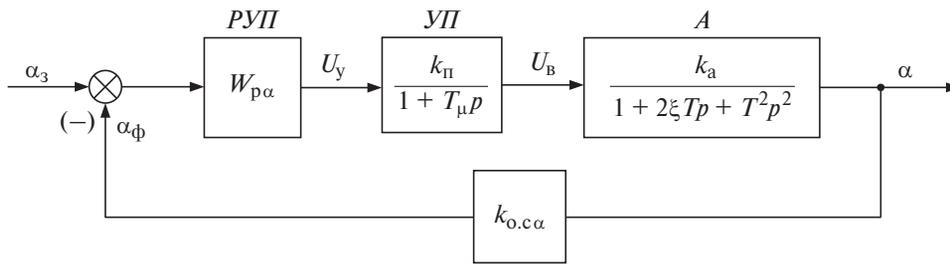


Рис. 2

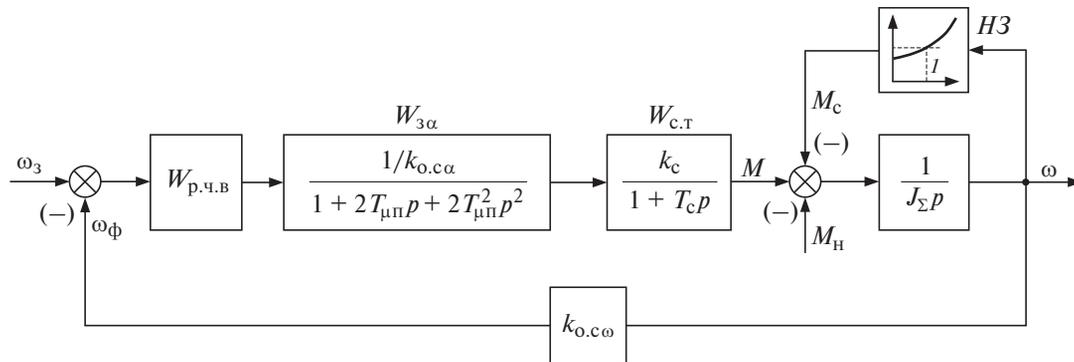


Рис. 3

та вала актуатора. На выходе звена формируется электромагнитный момент  $M_a$ , из которого вычитается момент сопротивления возвратной пружины  $M_c$ , а результирующий момент прикладывается к интегрирующему звену с коэффициентом  $k_a$ . Формируемая на выходе этого звена скорость поворота вала актуатора  $\dot{\alpha}$  преобразуется пропорциональным звеном с коэффициентом  $C_3$  в противо-ЭДС и интегрирующим звеном — в угол поворота вала  $\alpha$ . Так как значение угла поворота вала актуатора лимитировано, на его выходе установлен ограничитель *ОГР*. Обратная связь по моменту сопротивления пружины реализована через звено с постоянным коэффициентом  $k_c$ , характеризующим ее жесткость.

Как видно из структурной схемы актуатора, в ней присутствуют перекрестные связи и нелинейный элемент типа “насыщение”. Преобразовав эту схему для случая малых отклонений, получим передаточную функцию актуатора

$$W_a = \frac{k_M / k_c}{1 + \left(T_3 + \frac{k_M}{k_c} C_3\right) p + \left(\frac{1}{k_a k_c}\right) p^2 + \left(\frac{T_3}{k_a k_c}\right) p^3}. \quad (3)$$

Анализ этого выражения свидетельствует, что слагаемым в знаменателе, содержащем  $p^3$ , можно пренебречь, а передаточную функ-

цию актуатора заменить колебательным звеном.

Структурная схема замкнутого контура регулирования угла поворота вала актуатора (см. рис. 2) состоит из регулятора угла поворота вала *РУП*, быстродействующего управляемого преобразователя *УП*, актуатора *А* и цепи обратной связи с коэффициентом  $k_{o, c \alpha}$ . *УП*, обеспечивающий регулирование напряжения возбуждения, может быть представлен апериодическим звеном с коэффициентом  $k_{\Pi}$  и малой постоянной времени  $T_{\mu\Pi}$ . Для настройки системы регулирования на модульный оптимум передаточная функция разомкнутого контура должна иметь следующий вид:

$$W_{\text{раз}\alpha} = \frac{1/k_{o, c \alpha}}{2T_{\mu\Pi} p (1 + T_{\mu\Pi} p)}.$$

Для этого необходим ПИД-регулятор угла поворота. Тогда передаточная функция замкнутого контура будет представлена колебательным звеном с коэффициентом демпфирования  $\xi = 0,707$  и постоянной времени  $\sqrt{2}T_{\mu\Pi}$ .

Структурная схема внешнего контура регулирования частоты вращения представлена на рис. 3. Она содержит регулятор частоты вращения с передаточной функцией  $W_{p, \text{ч.в}}$ , замкнутый внутренний контур регулирования

угла поворота вала актуатора с передаточной функцией  $W_{3\alpha}$ , узел сгорания топлива с передаточной функцией  $W_{с.т}$  и элементы механической части двигателя.

Передаточная функция  $W_{с.т}$  может быть представлена апериодическим звеном с коэффициентом  $k_c$  и малой постоянной времени  $T_c$ . Механическая часть двигателя включает в себя интегрирующее звено с коэффициентом, равным суммарному моменту инерции генераторного агрегата  $J_\Sigma$ , которое охвачено обратной связью, определяемой характеристикой нелинейного звена (*НЗ*). Характеристика *НЗ* определяет механические потери в самом агрегате, которые состоят из постоянных потерь и потерь, пропорциональных квадрату частоты вращения. При номинальной частоте вращения (точка *1* на характеристике *НЗ*) механическую часть агрегата можно представить апериодическим звеном:

$$W_M = \frac{1/k_{o.c}}{1+J'_\Sigma p},$$

где  $k_{o.c} = M_c / \omega_{ном}$ ;  $J'_\Sigma = J_\Sigma / k_{o.c}$ ;  $M_c$  — момент сопротивления холостого хода при  $\omega_{ном}$ .

Тогда передаточная функция разомкнутого внешнего контура регулирования частоты вращения

$$W_{раз\omega} = W_{р.ч.в} \frac{k_\Sigma}{(1+T_{\mu\omega} p)(1+J'_\Sigma p)},$$

где  $k_\Sigma = k_c / (k_{o.c} \alpha k_{o.c})$  — эквивалентный коэффициент передачи разомкнутой системы;  $T_{\mu\omega} = \sqrt{2} T_{\mu\pi} + T_c$  — малая некомпенсируемая постоянная времени контура.

При настройке контура на модульный оптимум необходим ПИ-регулятор частоты вращения, а передаточная функция разомкнутой системы должна иметь вид

$$W_{раз\omega} = \frac{1/k_{o.c}\omega}{2T_{\mu\omega} p(1+T_{\mu\omega} p)}.$$

Как известно [2], статические ошибки по задающему и возмущающему воздействиям в этом случае будут отсутствовать. Однако основной интерес представляет поведение замкнутой системы в динамических режимах при набросе и сбросе нагрузки (изменениях  $M_H$ ). Наброс нагрузки, как и ее сброс, может достигать 100 % от номинального значения. Для увеличения точности регулирования частоты вращения в этих режимах могут потребоваться более высокие коэффициенты усиления, чем те, которые обеспечиваются

настройкой системы на модульный оптимум. Кроме того, для уменьшения значений провалов и всплесков частоты вращения может быть применена положительная компенсирующая связь по активной составляющей тока нагрузки генератора. Исследование динамики системы должно проводиться с учетом насыщения регулятора частоты вращения, ограничения угла поворота вала актуатора, ограничивающего подачу топлива и как следствие — движущий момент, развиваемый двигателем. Наличием импульсного элемента в канале обратной связи по скорости при частотах вращения вала двигателя 500 — 1500 об/мин и количестве зубьев на венце маховика от 50 и более можно пренебречь и считать обратную связь безынерционной.

Для исследования динамических режимов работы генераторного агрегата (с учетом принятых допущений) была разработана модель системы в пакете прикладных программ Matlab Sumilink (см. рис. 4). Параметры модели рассчитывали для дизель-генераторного агрегата АД200-Т400(964) мощностью 200 кВт (частота вращения — 1500 об/мин).

Задатчик интенсивности *Sub1* формирует линейно нарастающее задающее воздействие, поступающее на вход ПИ-регулятора, состоящего из колебательного звена *TF1* и усилительного звена *G1*. На выходе регулятора установлен ограничитель *Sat1*, сигнал с которого через сумматор *C1* подается на колебательное звено *TF2*, представляющее собой замкнутый контур регулирования угла поворота вала актуатора. Апериодическое звено *TF3* задает параметры узла сгорания топлива, а его выходной координатой является движущий момент, развиваемый двигателем. Из этого момента вычитаются собственный момент сопротивления генераторного агрегата, передаваемый от сумматора *C2*, и момент нагрузки, формируемый на выходе усилительного звена *G3*. На вход последнего поступает сигнал, пропорциональный активному току генератора (от *TF6*), а задание значения тока обеспечивает *Signal Builder*. Сигнал, определяющий результирующий момент, формируется на выходе сумматора *C3* и поступает на интегрирующее звено *TF4*. Последнее моделирует механическую часть дизеля и охвачено обратными связями, определяющими составляющие собственного момента сопротивления агрегата. Появившийся на выходе интегрирующего звена сигнал частоты вращения генераторного агрегата преобразуется в *G6* в сигнал обратной связи, ко-

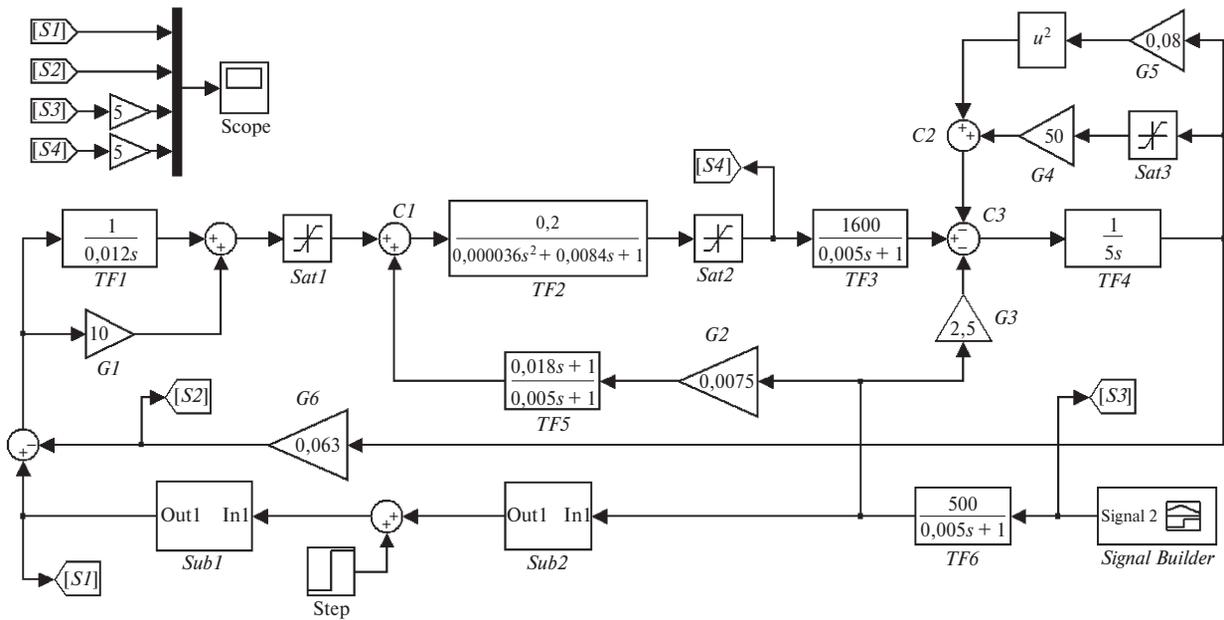


Рис. 4

торый поступает на вход регулятора частоты вращения. Цепочка  $G_2$ ,  $TF_5$  моделирует канал положительной компенсирующей связи по активному току нагрузки. Задатчик интенсивности  $Sub_2$  позволяет реализовать режим регулирования частоты вращения дизеля в функции нагрузки на его валу.

На первом этапе исследования системы определяли оптимальные параметры регулятора частоты вращения при воздействии на вал двигателя импульса, равного номинальной нагрузке. Анализ результатов моделирования показал, что настройка контура регулирования частоты вращения на модульный оптимум не обеспечивает быстрое восстановление частоты вращения после наброса и сброса нагрузки. При уменьшении постоянной времени интегрирования регулятора с 0,64 с (полученной для модульного оптимума) до 0,012 с время восстановления частоты вращения составило 0,2 и 0,3 с при набросе и сбросе нагрузки соответственно. При этом провал и всплеск частоты вращения не превышали 5 и 6 % соответственно. Дальнейшее уменьшение постоянной интегрирования приводило к повышению колебательности и перерегулирования в кривой переходного процесса.

На рис. 5 приведены результаты моделирования системы стабилизации частоты вращения генераторного агрегата в зависимости от значения нагрузки на его валу при отсутствии (а) и наличии (б) компенсирующей связи (здесь приняты следующие обозначения:

1 и 2 — заданная и фактическая частоты вращения; 3 — момент нагрузки на валу; 4 — подача топлива). Из диаграммы переходного процесса при оптимальной, на наш взгляд, настройке (см. рис. 5, а) следует, что при набросе нагрузки подача топлива (угол поворота вала актуатора) достигает предельного значения, а при сбросе падает до нуля.

Как показали исследования, введение компенсирующей связи по активному току нагрузки позволило существенно снизить как всплески и провалы частоты вращения, так и время ее восстановления до номинального значения. В этом случае, как следует из диаграммы переходного процесса на рис. 5, б, процесс нарастания подачи топлива при набросе нагрузки в начальный момент времени становится более интенсивным, в результате чего значение провала снижается до 1 %, а время восстановления — до 0,05 с. При сбросе нагрузки всплеск частоты вращения уменьшается до 1,2 % (за счет форсированного снижения подачи топлива), но не падает до нуля. Время восстановления частоты вращения при этом составляет 0,06 с. Разница в переходных процессах при провалах и всплесках частоты вращения объясняется тем, что замедление двигателя происходит только под действием собственного момента сопротивления.

На втором этапе моделирования проводили исследование системы в случае регулирования частоты вращения генераторного агрегата в зависимости от значения нагрузки на

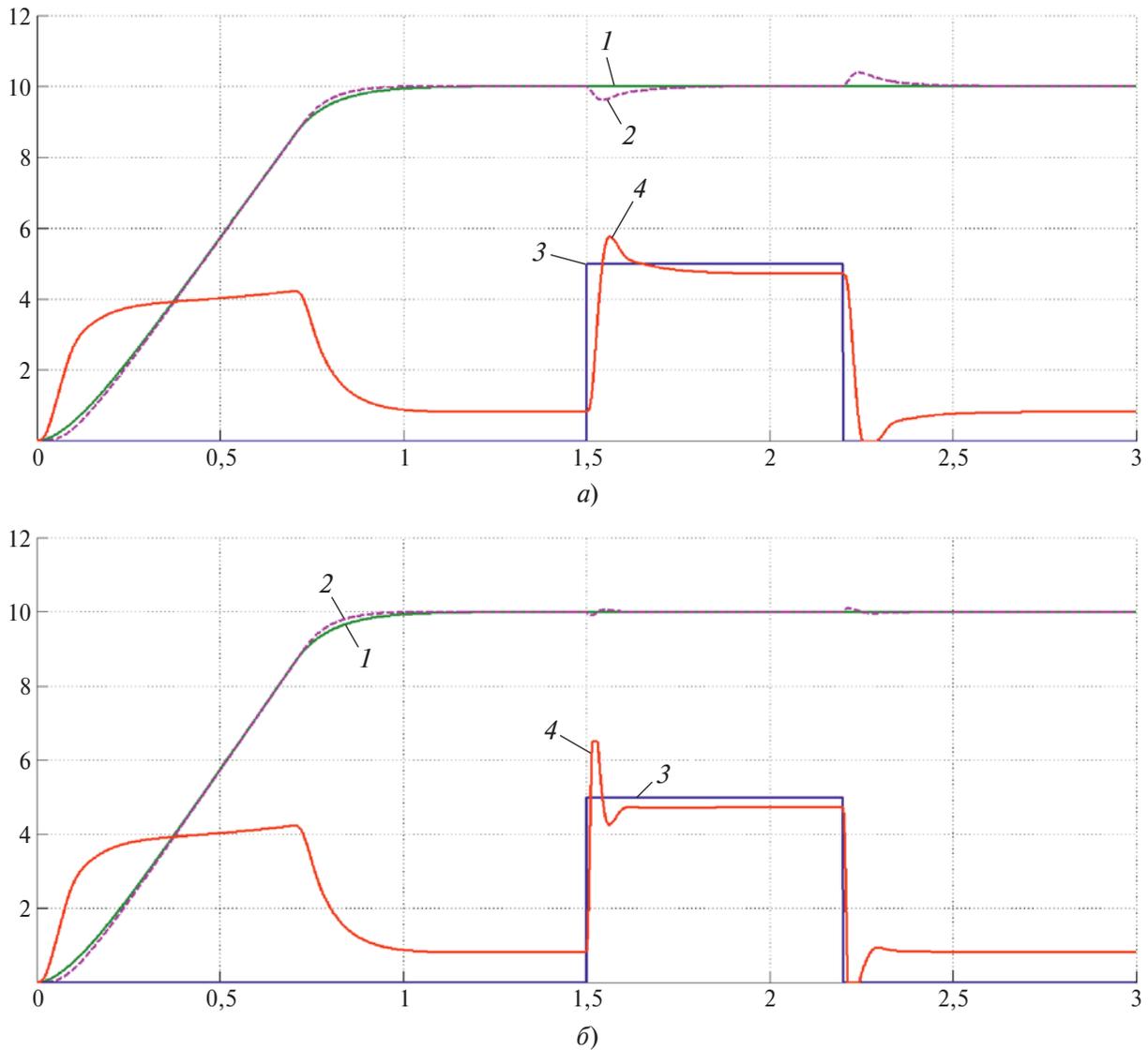


Рис. 5

его вала. Как показано в [3], для получения оптимального расхода топлива в таких системах при уменьшении нагрузки на валу генераторного агрегата от номинальной до 0,3 номинального значения частота его вращения должна снижаться соответственно от номинального до 0,7 номинального значения.

Реализация такого управления частотой обеспечивается с помощью задатчика интенсивности *Sub2* (рис. 4). На его входе *Signal Builder* формирует разноуровневый сигнал, соответствующий изменению момента сопротивления (активного тока нагрузки генератора). На рис. 6 представлены результаты указанного моделирования при отсутствии (а) и наличии (б) компенсирующей связи (обозначения 1–4 те же, что и на рис. 4). Как видно из диаграмм (см. рис. 6, а), при отсутствии компенсирующей связи изменение на-

грузки приводит к провалам и всплескам частоты вращения генераторного агрегата, значения которых пропорциональны перепадам момента сопротивления. Включение компенсирующей связи (см. рис. 6, б) обуславливает их существенное снижение. Для этого режима время восстановления частоты вращения (вследствие особенностей работы таких систем) не является определяющим и зависит от настройки задатчика интенсивности.

Результаты проведенного моделирования позволили определить оптимальные параметры регулирования частоты вращения генераторного агрегата. Кроме того, они показали, что можно существенно повысить быстродействие и точность регулирования в динамических режимах работы, применяя двухконтурную сис-

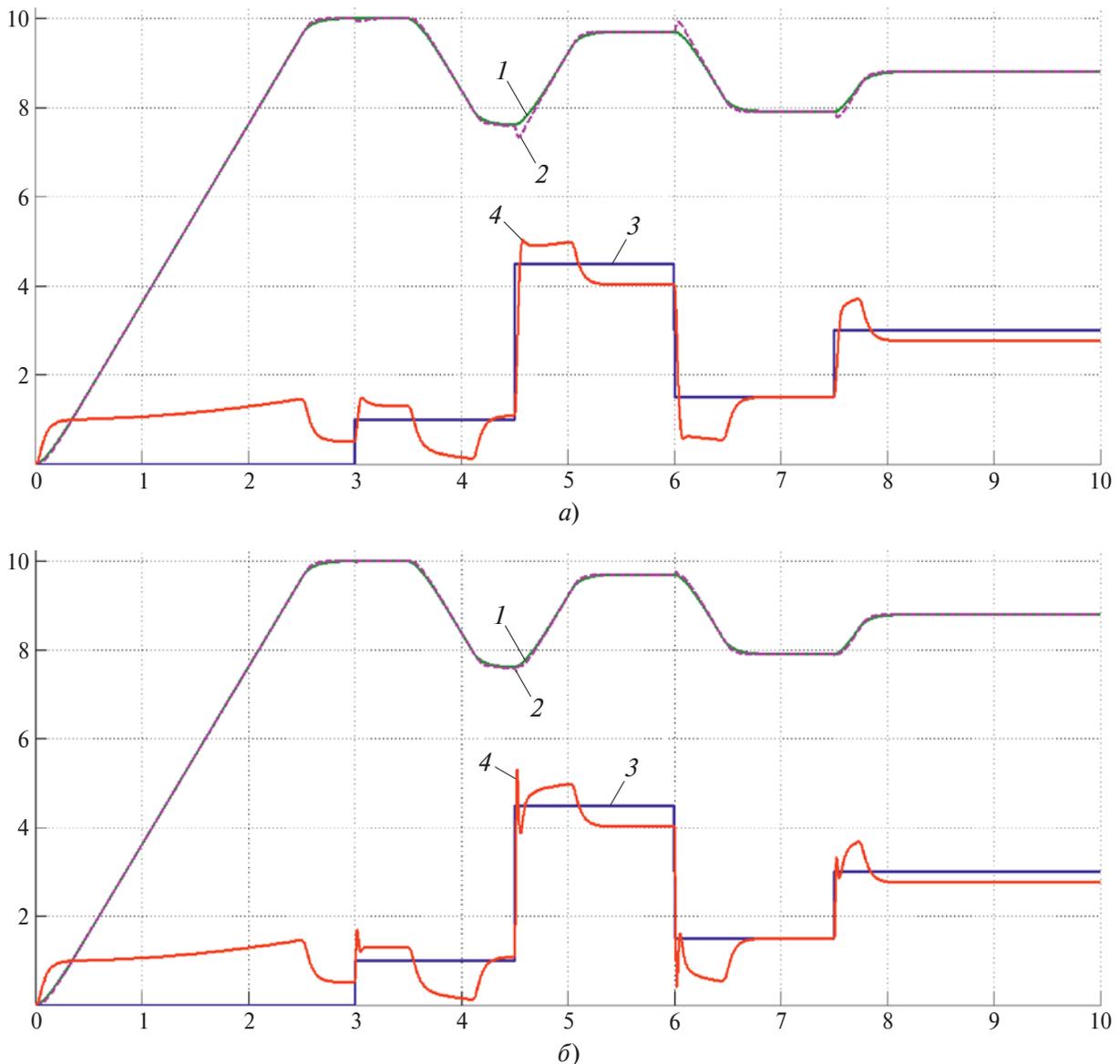


Рис. 6

тему регулирования с компенсирующей связью по моменту нагрузки.

#### Список литературы

1. Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Пшеничников В. В. Автономный дизель-генератор переменной скорости вращения на базе синхронного генератора (Тр. 14-го междунар. науч.-промышленного форума "Великие реки": Материалы науч.-методической конф. "Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек". Т. 2). — Н. Новгород: ВГАВТ, 2012.
2. Теория автоматического управления / С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев и др. — М.: Высшая школа, 2009.
3. Хватов О. С., Поляков И. С., Дарьенков А. Б. Модель задатчика экономичного режима работы дизель-генераторной установки с переменной частотой вращения (Материалы науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы электроэнергетики"). — Н. Новгород: НГТУ, 2010.

khvatov@vgavt-nn.ru