

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант ВЛАСЕНКО А. А.

На правах рукописи

**Исследование инвариантных систем
авторегулирования скорости
(частоты) дизель-генераторных
установок**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Кринецкий И. И.

ОДЕССА
1964

Министерство высшего и среднего специального образования
УССР

—о—

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант ВЛАСЕНКО А. А.

На правах рукописи

Исследование инвариантных систем
авторегулирования скорости
(частоты) дизель-генераторных
установок

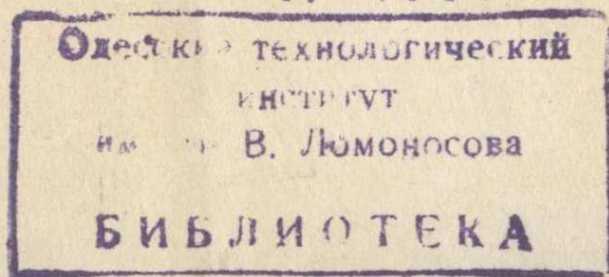
Переучет 1987 г.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Кринецкий И. И.

✓ 000668

~~с.в.668~~



ОДЕССА
1964

ОНАХТ 06.07.11
Исследование инвариантных систем



v000668

Работа выполнена на кафедре теоретических основ автоматки и вычислительной техники Одесского Высшего инженерного морского училища.

Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова направляет Вам автореферат диссертации «Исследование инвариантных систем авторегулирования скорости (частоты) дизель-генераторных установок», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук аспирантом А. А. Власенко.

Защита диссертации намечается на „20“ ноябрь 1964 г. Ваши отзывы и замечания в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: г. Одесса, ул. Свердлова, № 112, Технологический институт.

Ученый секретарь Совета

Яковенко В. А. (Яковенко В. А.)

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач строительства коммунистического общества является автоматизация всех видов промышленности и транспорта. Автоматизация производственных процессов на судах морского флота позволяет значительно сократить эксплуатационные расходы, обеспечить безаварийность плавания и облегчить труд моряков.

Техника на судах морского флота развивается настолько быстро, что решения, применявшиеся в недалеком прошлом, оказываются недостаточными в настоящее время. Такое положение можно констатировать в отношении автоматического регулирования скорости вращения вала (частоты) дизель-генераторных установок.

В настоящее время на судах морского флота применяются, в основном, центробежные регуляторы, которые не могут обеспечить требуемое качество регулирования.

Для морского транспорта также, как и для других отраслей народного хозяйства на современном этапе развития техники актуальное значение приобретает проблема создания высококачественных систем автоматического регулирования. Как показал опыт создания современных автоматических систем, наиболее эффективными оказываются системы, разработанные на основе компенсации возмущений или инвариантности (независимости) регулируемой величины от внешних возмущений, действующих на объект регулирования. Впервые идеи инвариантности были высказаны профессором Г. В. Щипановым. Дальнейшее развитие ее также связано с именами советских ученых.

К настоящему времени наиболее полно разработана теория инвариантности линейных автоматических систем. Однако большинство реальных систем автоматического регулирования являются существенно нелинейными системами. Наличие люфтов, гистерезиса, трения, ограниченной мощности сервоприводов и других факторов приводит к тому, что обычный линейный математический аппарат в принципе не может быть использован для исследования таких существенно нелинейных автоматических систем.

Целью реферируемой работы являлось теоретическое исследование и создание действующего макета типового комбинированного инвариантного автоматического регулятора.

В диссертации произведено детальное теоретическое обоснование ряда схем инвариантных автоматических регуляторов скорости вращения вала (частоты) дизель-генераторных установок.

В настоящее время предложено несколько новых методов исследования нелинейных автоматических систем (Павлов В. В.—Институт кибернетики АН УССР, Розоноэр Л. И.—ИАГ АН СССР, Догановский С. А. и др.).

Один из таких методов разработан на кафедре автоматики ОВИМУ Фокиным А. В. В настоящей работе автор в развитие этого метода разработал методику исследования некоторых типов систем автоматического управления. Произведенные теоретические разработки, а также математическое моделирование позволили обосновать рациональные принципиальные схемы новых типовых инвариантных автоматических регуляторов, обладающих рядом преимуществ по сравнению с применяющимися автоматическими регуляторами.

Экспериментальные исследования разработанных автором макетов типовых инвариантных регуляторов на реальных физических объектах подтвердили практическую возможность осуществления инвариантных систем автоматического регулирования. Рекомендуемый в диссертации типовой инвариантный регулятор частоты дизель-генераторных установок внедряется на судах советского Дунайского государственного пароходства. Однако он может быть применен не только для регулирования скорости (частоты) дизель-генераторных установок, но и в целом ряде других случаев.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений.

I

В первой главе приводится краткий исторический путь развития теории инвариантности и краткое изложение основных теоретических положений нелинейной теории инвариантности, разработанной в ОВИМУ.

Впервые теория инвариантности была разработана профессором Щипановым Г. В. в 1938 году. В своей работе проф. Щипанов Г. В. доказывал возможность создания автоматических регуляторов, способных полностью компенсировать влияние возмущающих сил на машину или процесс.

В настоящее время эта теория получила широкое признание и развивается в капитальных трудах наших отечественных ученых применительно не только к линейным системам, но и к другим классам систем автоматического управления.

Как уже указывалось в введении, в области разработки теории инвариантности нелинейных автоматических систем

получены важные теоретические результаты. Используемый в диссертации метод исследования нелинейных инвариантных автоматических систем базируется на рассмотрении самих дифференциальных уравнений, а не их решений, как имело место в предшествующих работах.

Фокиным А. В. показано, что если некоторая система автоматического регулирования описывается следующей системой дифференциальных уравнений общего вида:

$$\left. \begin{aligned} F_1(x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z}) &= f(t) \\ F_2(x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z}) &= 0 \\ F_3(x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z}) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где x, y, z — соответственно координаты: регулируемая, чувствительно-усилительного элемента и регулирующего органа;

$f(t)$ — внешнее возмущение (нагрузка),
то сопоставив системе уравнений (1) систему:

$$\left. \begin{aligned} F_1(x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z}) &= \alpha f(t) \\ F_2(x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z}) &= 0 \\ F_3(x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}, z, \dot{z}, \ddot{z}) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где α — параметр, характеризующий величину («интенсивность») возмущающего воздействия, можно утверждать, что система уравнений (1) будет инвариантной по координате x в отношении возмущающего воздействия $f(t)$, если координата x , определяемая системой уравнений (2), не будет зависеть от параметра α .

Математически это условие можно записать:

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha} \equiv 0. \quad (3)$$

Следует отметить, что комплекс $\alpha \cdot f(t)$ неразделим, поэтому независимость x от α одновременно означает и независимость от возмущения $f(t)$. Кроме того, предполагается, что функции, входящие в левые части системы уравнений (1), дифференцируемы по всем своим аргументам.

Этот метод представляет собой обобщенный принцип инвариантности, поскольку он применим к расчету различного класса систем автоматического управления (линейных, нелинейных и т. д.).

Существо этого метода иллюстрируется в первой главе применительно к нелинейным автоматическим системам, работающим по отклонению и по комбинированному принципу.

Изложенная в первой главе теория используется во второй и третьей главах диссертации при исследованиях некоторых типов нелинейных систем автоматического регулирования.

II

Вторая глава посвящена расчету и исследованию нелинейных систем автоматического регулирования скорости вращения вала (частоты) дизель-генераторных установок, работающих по отклонению.

Рассматриваемая нелинейная система автоматического регулирования описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} (T_1 p + 1)x - \kappa_1 z &= -\kappa_2 \Delta I_{\text{ар}} \\ -\kappa_3 x + (T_2 p + 1)y &= 0 \\ F(y) + pz &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где x, y, z — изменения соответственно регулируемой величины, координаты чувствительно-усилительного элемента и координаты регулирующего органа;

$T_1 T_2$ — постоянные времени соответственно дизель-генератора и чувствительно-усилительного элемента;

$\kappa_i (i = 1, 2, 3)$ — коэффициенты усиления;

$F(y)$ — существенно нелинейная функция (нелинейная характеристика гидравлического сервопривода);

$\Delta I_{\text{ар}}$ — внешнее возмущение (приращение активной составляющей тока статора генератора);

$p = \frac{d}{dt}$ — символ дифференцирования.

В работе показано, что при выполнении условий инвариантности (начальные условия принимаются нулевыми) рассматриваемая система должна описываться следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (T_1 p + 1)x - \kappa_1 z &= -\kappa_2 \Delta I_{\text{ар}} \\ -\kappa_3 x + \left(\frac{T_c p + 1}{B} \right) B F(y) + (T_c p^2 + B p) z &= 0 \\ F(y) + pz &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где T_c, B — постоянные параметры.

Таким образом, при выполнении условий инвариантности в нелинейных системах требуется вводить дополнительную нелинейность, компенсирующую имеющуюся в системе нели-

нейность. Показано, что условия инвариантности в нелинейных системах зависят от начальных условий.

Для обеспечения устойчивости рассматриваемой инвариантной системы требуется в закон регулирования вводить производные от регулируемой величины x . Рассмотрен вопрос физической реализуемости условий инвариантности.

Результаты теоретических исследований проверены моделированием на электронной моделирующей машине типа МН-7. Отмечено, что инвариантные системы автоматического регулирования скорости (частоты) дизель-генераторных установок, работающие по отклонению, обладают рядом существенных недостатков:

1. В рассматриваемом классе систем невозможно физически реализовать условия абсолютной инвариантности. Для таких регуляторов возможно приближенное выполнение условий инвариантности.

2. При достаточно близком приближении к условиям абсолютной инвариантности необходимо принимать специальные меры для обеспечения устойчивости.

3. Рассматриваемые инвариантные регуляторы, работающие по отклонению, не могут быть использованы для регулирования параллельно работающих дизель-генераторных установок, поскольку при этом распределение активной нагрузки становится весьма неопределенным.

Учитывая вышеуказанные недостатки, необходимо отметить, что рассмотренные в этой главе инвариантные автоматические регуляторы скорости (частоты) могут быть рекомендованы для применения при отдельной работе дизель-генераторных установок.

III

Третья глава посвящена расчету и исследованию нелинейных инвариантных систем автоматического регулирования скорости вращения вала (частоты) дизель-генераторных установок, работающих по комбинированному принципу.

Как показано во второй главе, в системах по отклонению при реализации условий инвариантности до ε необходимо учитывать возможность изменения параметров системы (особенно в судовых условиях) и связанное с этим нарушение выполненных условий инвариантности и, что особенно важно, устойчивости системы.

Кроме того, при регулировании скорости вращения вала (частоты) дизель-генераторных установок одним из важнейших вопросов является возможность обеспечения пропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими дизель-генераторами.

Это затруднение устраняется, если регулирование дизель-генераторов осуществляется инвариантными автоматическими регуляторами, работающими по комбинированному (реагирующими как на отклонение регулируемой величины, так и на отклонение нагрузки) принципу.

Поэтому трудности, возникающие при создании судовых инвариантных систем автоматического регулирования, работающих по принципу отклонения, привели к необходимости исследования нелинейных комбинированных систем с целью определения возможностей использования подобных систем для автоматического регулирования частоты судовых источников электрической энергии.

Преимуществом комбинированных систем автоматического регулирования по сравнению с системами регулирования по принципу отклонения является также то, что введение в систему связей по возмущению не изменяет вида характеристического уравнения и, следовательно, не нарушает устойчивости системы.

В работе показано, что если исходная комбинированная автоматическая система описывается следующей упорядоченной системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (T_1 p + 1)x - \kappa_1 z &= -\kappa_2 \Delta I_{\text{ар}} \\ -\kappa_3 x + (T_2 p + 1)y - \kappa_4 z &= \kappa_5 \Delta I_{\text{ар}} \\ F(y) + pz &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

то инвариантная автоматическая система описывается системой уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} (T_1 p + 1)x - \kappa_4 z &= -\kappa_2 \Delta I_{\text{ар}} \\ -\kappa_3 x + \left(\frac{T_c}{B} p + 1 \right) BF(y) - \kappa_4 z &= - \left[\frac{\kappa_4 \cdot \kappa_2}{\kappa_1} + \frac{B \kappa_2}{\kappa_1} p + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_c \kappa_2}{\kappa_1} p^2 \right] \Delta I_{\text{ар}} \\ F(y) + pz &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где κ_4 — коэффициент жесткой обратной связи.

Рассматриваемый в этой главе типовой комбинированный инвариантный автоматический регулятор скорости (частоты) дизель-генераторной установки разработан в процессе детальных теоретических исследований (с учетом нелинейности системы) с использованием математического моделирования и путем экспериментального исследования разработанного макета на специальном лабораторном динамическом стенде и на реальном дизель-генераторе (результаты экспериментальных исследований излагаются в четвертой главе).

Приведенные в этой главе теоретические исследования показали возможность создания высококачественного автоматического регулятора.

В процессе этих исследований получены условия инвариантности нелинейных систем при обеспечении устойчивости. Проведенное математическое моделирование разрабатываемой автоматической системы при заданных параметрах показало, что в некоторых случаях влияние нелинейности незначительное и поэтому условие инвариантности можно выполнять в линейном варианте, т. е. без ввода дополнительной компенсирующей нелинейности, требуемой условиями инвариантности для нелинейных автоматических систем.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для автоматического регулирования скорости объектов, находящихся под действием неустановившейся нагрузки, целесообразно применять комбинированные инвариантные регуляторы по схеме, обоснованной в данной главе.

IV

Четвертая глава содержит результаты теоретического и экспериментального исследования макета типового комбинированного инвариантного регулятора скорости (частоты) дизель-генераторной установки.

Динамика дизель-генератора описывается дифференциальным уравнением (типа апериодического звена) первого порядка. Значение постоянной времени находится в пределах 2 — 4,5 сек, а коэффициенты усиления по рейке топливного насоса и по возмущению соответственно $4 \left[\frac{24}{\text{мм}} \right]$; $0,02 \left[\frac{a}{\text{мм}} \right]$.

Система дифференциальных уравнений, описывающая комбинированную инвариантную систему автоматического регулирования скорости (частоты) дизель-генераторных установок при выполнении условий инвариантности, в линейном варианте имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} (T_1 p + 1)x - \kappa_1 z &= -\kappa_2 \Delta I_{\text{ар}} \\ -\kappa_3 x + (T_2 p + 1)y - \kappa_4 z &= - \left[\frac{\kappa_4 \kappa_2}{\kappa_1} + \frac{\kappa_2}{h(A)\kappa_1} p + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_2 \kappa_2}{h(A)\kappa_1} p^2 \right] \Delta I_{\text{ар}} \\ F(y) + pz &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Производя гармоническую линеаризацию нелинейной функции

$$F(y) = h(A) \cdot y, \quad (9)$$

где $h(A)$ — коэффициент гармонической линеаризации, характеристическое уравнение, соответствующее приведенной системе уравнений, можно записать

$$T_1 T_2 p^3 + (T_1 + T_2) p^2 + (T_1 \kappa_4 h(A) + 1) p + (\kappa_1 \kappa_3 + \kappa_4) h(A) = 0. \quad (10)$$

Показано, что при

$$\kappa_4 > \frac{T_2 \kappa_1 \kappa_3}{T_1} \quad (11)$$

регулирование всегда будет устойчиво без автоколебаний.

В процессе экспериментального исследования, выполненного макета типового инвариантного регулятора скорости на дизель-генераторе (дизель типа 2Ч 10,5/13, мощностью 20 э.л.с. при 1500 об/мин, генератор типа ПН-100, $P_H = 12,5$ кВт, $U_H = 115$ вольт, $I_H = 109$ ампер) установлено следующее:

1. Регулятор работал устойчиво как при номинальной нагрузке, так и в режиме холостого хода.

2. В режиме вынужденных колебаний при периодическом возмущении, близком к гармоническому, с амплитудой внешнего возмущения (нагрузки), равной номинальной величине, отклонение скорости вращения вала дизель-генератора от заданной практически отсутствовало (не превышало 0,2% номинального значения).

3. При мгновенном включении и выключении 100% нагрузки в инвариантном режиме максимальное отклонение скорости вращения вала дизель-генератора не превосходило 0,5% от номинальной, а время переходного процесса 0,35 сек.

Результаты испытания макета инвариантного регулятора скорости вращения вала дизель-генераторной установки позволяют сделать вывод о возможности разработки эксплуатационных образцов регулятора не только для судовых дизель-генераторных установок, но и для других объектов регулирования.

В приложениях приводятся уравнения отдельных элементов, используемых в разрабатываемых регуляторах скорости (частоты) дизель-генераторных установок, и результаты экспериментального определения их параметров.

ВЫВОДЫ

1. Из опыта эксплуатации известно, что применяемые в настоящее время на судах морского флота центробежные регуляторы скорости вращения вала (частоты) дизель-генераторных установок принципиально не могут обеспечить требуемого качества регулирования, поэтому в целях достижения высококачественного регулирования целесообразно применять автоматические регуляторы, разработанные на другом принципе и в частности на принципе теории инвариантности.

2. В диссертации в развитие существующей теории нелинейных инвариантных систем разработана методика исследования систем автоматического регулирования скорости (частоты) дизель-генераторных установок, работающих по отклонению и по комбинированному принципу.

3. Основная специфическая особенность осуществления инвариантных нелинейных автоматических систем заключается в необходимости введения в систему дополнительного компенсирующего нелинейного звена.

4. При выполнении условий инвариантности в нелинейной системе авторегулирования скорости (частоты) дизель-генераторной установки существующая нелинейность компенсируется дополнительно введенной нелинейностью, вследствие чего разрабатываемая автоматическая система, с точки зрения протекающих в ней процессов, становится линейной и поэтому расчет системы производится при помощи обычного линейного математического аппарата.

5. Проведенные теоретические исследования, а также моделирование комбинированных систем авторегулирования скорости (частоты) дизель-генераторных установок показали, что в системах комбинированного регулирования можно достичь абсолютной инвариантности скорости (частоты) дизель-генераторной установки от нагрузки, причем, благодаря наличию в регуляторе измерительной связи по нагрузке обеспечивается пропорциональное распределение нагрузки между параллельно работающими агрегатами.

6. Используя вышеуказанную теорию нелинейных инвариантных систем, автором разработан макет типового инвариантного регулятора скорости (частоты) дизель-генераторных установок, испытания которого на реальном объекте показали высокое качество регулирования.

7. Рекомендуемый инвариантный автоматический регулятор скорости (частоты) дизель-генераторных установок открывает широкие возможности разработки инвариантных автоматических регуляторов для целого ряда объектов регулирования.

Основное содержание работы опубликовано в работах:

1. Инвариантный регулятор частоты судового дизель-генератора. Материалы научно-технической конференции по комплексной автоматизации силовых установок и механизации работ на судах Министерств морского и речного флота. Отдел отраслевой научной и технико-экономической информации, Москва, 1964.

2. К вопросу расчета нелинейных инвариантных систем. Тезисы докладов Первой республиканской научной конференции молодых исследователей. Институт математики АН УССР, 1964.

По вопросам, рассматриваемым в диссертации, автором сделаны следующие доклады:

1. На Всесоюзной конференции по комплексной автоматизации силовых установок и механизации работ на судах ММФ и МРФ, состоявшейся в г. Измаиле, 1963 г.

2. На первой республиканской научной конференции молодых исследователей, состоявшейся в Институте математики АН УССР, 1964 г.

3. На Юбилейной конференции профессорско-преподавательского состава Одесского Высшего инженерного морского училища, 1964 г.

—○—