

УДК 622.232

С.В. Дубинин (канд. техн. наук, доц.),
В.Н. Деканенко (канд. техн. наук, доц.), Т.Б. Синюкова
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра «Горная электротехника и автоматика им. Р.М.Лейбова»
E-mail: geantu@mail.ru, sinyukova_tb@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЕЙНО-ИМПУЛЬСНЫХ АВТОРЕГУЛЯТОРОВ ГОРНЫХ МАШИН

Выполнен системный анализ и синтез САР нагрузки для объектов с последствием, ориентированный для проведения простейших вычислений в реальном времени на базе микропроцессорной техники, с целью повышения качественных характеристик системы регулирования. На основе предложенной методики гармонической линейаризации нелинейных элементов САР определяются основные параметры САР, обеспечивающие необходимый запас устойчивости при автоматической стабилизации нагрузки горной машины.

Ключевые слова: *релейно-импульсный регулятор нагрузки, система автоматического регулирования, гармоническая линейаризация, стабилизация нагрузки, передаточная функция.*

Общая постановка проблемы

Управление современными регуляторами нагрузки горных машин, относящихся к классу нелинейных релейных или релейно-импульсных устройств, представляют сложную научно-техническую задачу. Это в свою очередь затрудняет проектирование систем автоматического регулирования (САР) нагрузки горных машин, обеспечивающих снижение дисперсии нагрузки во всех режимах работы горной машины по сравнению с ручным регулированием.

Как показывает опыт эксплуатации горных машин, наибольшее влияние на работу САР нагрузки оказывают факторы нестационарности объекта регулирования и наличие звеньев с распределенными параметрами, к которым относятся гидравлические рукава, бурильная колонна и т.п., порождающие явления чистого запаздывания или иначе - последствие. Из известных работ, посвященных анализу указанных систем, можно выделить [1-3]. Однако известные результаты не доведены до инженерных расчетов, что затрудняет их использование при разработке и проектировке регуляторов нагрузки.

Неучет факторов последствие и нестационарности приводит к ухудшению динамики работы горной машины в автоматическом режиме по сравнению с ручным. В ряде случаев это является причиной отключения регуляторов [4,5].

Следует также отметить, что не существует в настоящее время методики оценки амплитудно-частотных характеристик входного сигнала, который данная система регулирования может отработать. Осциллограммы нагрузки забойных машин позволяют определить верхнюю (основную) частоту колебаний нагрузки, которую необходимо стабилизировать. Как правило, эта частота совпадает или кратна частоте вращения исполнительного органа.

Для широкого класса горных машин основная гармоника нагрузки входного сигнала и ее амплитуда изменяются в широких пределах как при переходе от машины к машине, так и в процесс работы, что чаще всего связано с изменением крепости горного массива.

Основная (первая) гармоника оказывает наиболее существенное влияние на дисперсию нагрузки, поэтому быстродействия САР должно быть достаточно для ее стабилизации, но чрезмерно повышать быстродействие САР недопустимо, т.к. в этом случае система будет реагировать на высокочастотные составляющие нагрузки, связанные с естественным характером разрушения массива. Появление высокочастотных составляющих с большими амплитудами характерно при наиболее экономичном, объемном характере разрушения массива, когда имеет место явление скалывания. Если регулятор будет успевать реагировать и обрабатывать эти высокие частоты, то произойдет своего рода амортизация исполнительного органа, он не может скалывать, а будет лишь истирать горный массив, что приведет к повышению энергозатрат и снижению производительности машины. Поэтому регуляторы должны обладать способностью автоматической подстройки на основную частоту нагрузки и ее стабилизацию на фоне высокочастотных помех.

Постановка задач исследования

Указанные выше обстоятельства обуславливают актуальность решения следующих задач:

1. Разработка методики системного анализа и синтеза САР нагрузки для объектов с последствием, ориентированной для проведения простейших вычислений в реальном времени на базе микропроцессорной техники, с целью существенного повышения качественных характеристик системы регулирования.

2. Разработка новой методики на основе метода гармонической линеаризации нелинейных элементов САР, в том числе релейных, при помощи которой в замкнутой форме должны быть определены основные параметры САР, обеспечивающие устойчивую стабилизацию нагрузки (под стабилизацией здесь и далее понимается снижение амплитуды колебательной составляющей нагрузки, т.е. ее дисперсии).

Решение задач и результаты исследований

На рисунке 1 приведена структурная схема САР нагрузки горной машины, состоящей из регулятора 1, исполнительного механизма 2 и горной машины 3. Регулятор включает в себя задатчик уставки P_3 , устройство сравнения, релейный блок. Исполнительное устройство 2 осуществляет суммирование прямоугольных импульсов с регулятора 1 и преобразование их длительности в пропорциональную величину скорости подачи горной машины, которая представлена инерционным звеном с запаздыванием 3.

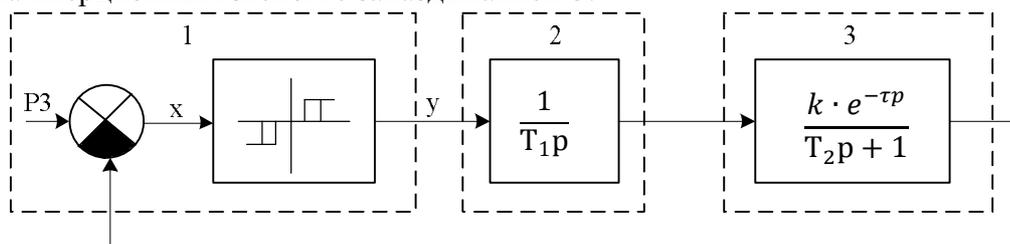


Рисунок 1 — Структурная схема САР нагрузки горной машины:

1 – регулятор нагрузки, 2 – исполнительный механизм, 3 – горная машина;
 P_3 – задатчик уставки; X – сигнал ошибки на входе релейного блока, y – выходная координата релейного блока; T_1 – постоянная интегрирования исполнительного устройства; T_2 – постоянная времени объекта регулирования; τ – постоянная запаздывания; k – коэффициент усиления объекта регулирования

На рисунке 2 приведена расчетная схема релейного блока при поступлении на его вход гармонического сигнала

$$x = A \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

Релейный блок имеет зону нечувствительности b , гистерезисную область с коэффициентом гистерезиса m . Выходной сигнал релейного блока на гармонический сигнал представлена в координатах (x, y, t) .

Для определения линеаризованной передаточной функции релейного блока найдем отношение выходного сигнала к входному, преобразовав их по Лапласу. Указанное отношение вычислим за период гармонического сигнала. Во временной области выходной сигнал релейного блока за период с помощью единичной ступенчатой функции представим в виде

$$y(t) = C[1(t-t_1) - 1(t-t_2) - 1(t-t_3) + 1(t-t_4)] \quad (2)$$

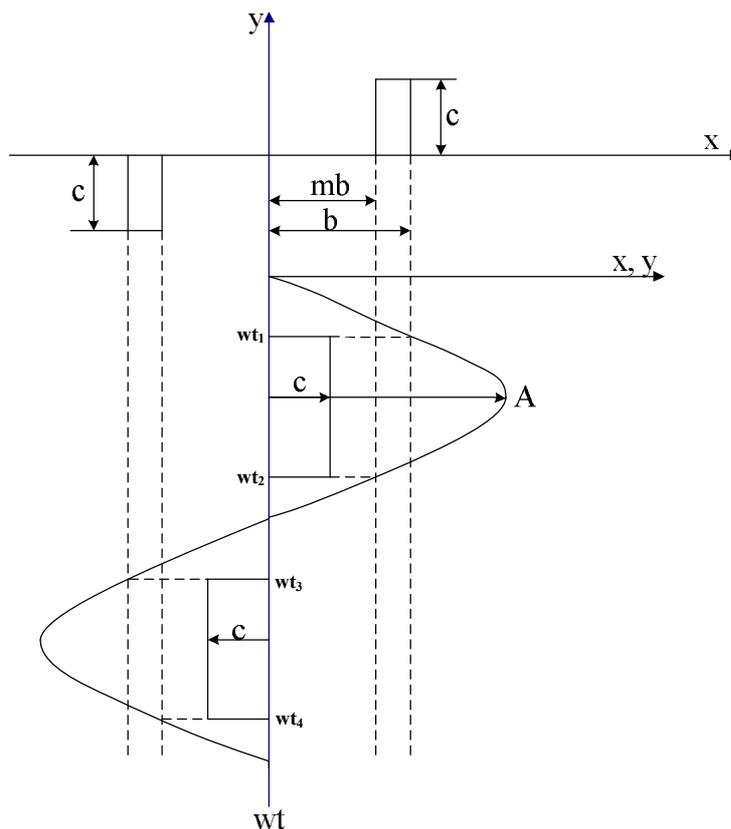


Рисунок 2 — Релейный блок:
 x, y, t — оси координат; C — выходной сигнал релейного блока;
 b — зона нечувствительности; m — коэффициент гистерезиса;
 A — амплитуда гармонического сигнала

Преобразовав выражение (2) по Лапласу [4], получим

$$y(p) = \frac{C}{p} (e^{-t_1 p} - e^{-t_2 p} - e^{-t_3 p} + e^{-t_4 p}) \quad (3)$$

Аналогично, преобразовав входной сигнал за рассматриваемый период по Лапласу, получим

$$x(p) = \frac{A\omega}{p^2 + \omega^2} (1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega} p}) \quad (4)$$

Тогда передаточная функция релейного блока будет равна

$$W_p(P) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{C(p^2 + \omega^2)}{A\omega p} \left(\frac{e^{-t_1 p} - e^{-t_2 p} - e^{-t_3 p} + e^{-t_4 p}}{1 - e^{-\frac{2\pi}{\omega} p}} \right) \quad (5)$$

В форме (5) передаточная функция релейного блока получена, по-видимому, впервые. Следует учесть, что передаточная функция получена в предположении гармонического входного сигнала и только для него она имеет место и не может быть распространена подобно линейному звену на все виды входных сигналов. Поэтому при использовании формулы (5) необходимо выполнение в динамической системе условия фильтрации низкочастотной составляющей. Подставляя в формулу (5) $p = j\omega$, что соответствует поиску синусоидального решения, и раскрыв по правилу Лопиталья неопределенность типа ноль на ноль в формуле (5), получим

$$W_p(j\omega) = \frac{C}{\pi A} (e^{-j\omega t_1} - e^{-j\omega t_2} - e^{-j\omega t_3} + e^{-j\omega t_4}) \quad (6)$$

Как следует из рисунка 2,

$$\sin \omega t_1 = -\sin \omega t_3 = \frac{b}{a'} \quad (7)$$

$$\sin \omega t_2 = -\sin \omega t_4 = \frac{mb}{A} \quad (8)$$

$$\cos \omega t_1 = -\cos \omega t_3 = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{A}\right)^2} \quad (9)$$

$$\cos \omega t_2 = -\cos \omega t_4 = \sqrt{1 - \left(\frac{mb}{A}\right)^2} \quad (10)$$

Используя формулы (7) - (10), преобразуем выражение (6) к виду

$$W_p(j\omega) = q - jq' \quad (11)$$

где

$$q = \frac{2C}{\pi A} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{b}{A}\right)^2} + \sqrt{1 - \left(\frac{mb}{A}\right)^2} \right), q' = \frac{b(1-m)}{A} \quad (12)$$

что эквивалентно выражению

$$W_p(P) = q - \frac{P}{\omega} q' \quad (13)$$

совпадающему с известным результатом гармонической линеаризации релейного блока [4]. Этим подтверждается правомерность принятого подхода к определению передаточной функции релейного звена в виде (5).

Определим условия возникновения автоколебаний в рассматриваемой системе регулирования. Как известно, при автоколебании выполняется соотношение

$$1 + W(P) = 0 \quad (14)$$

Подставив в формулу (14) данные САР, получим следующие условия автоколебаний

$$x(\omega, q, q') = 0 \quad (15)$$

$$y(\omega, q, q') = 0 \quad (16)$$

где

$$x(\omega, q, q') = kq \cos(\omega\tau) - kq' \sin(\omega\tau) - T_1 T_2 \omega^2 = 0 \quad (17)$$

$$y(\omega, q, q') = -kq \sin(\omega\tau) - kq' \cos(\omega\tau) + \omega T_1 = 0 \quad (18)$$

Из условий (17) и (18) получим условие баланса амплитуд

$$\sqrt{q^2 + q'^2} k = T_1 \omega \sqrt{1 + (T_2 \omega)^2} \quad (19)$$

и условие баланса фаз

$$\omega\tau + \arctg\left(\frac{q'}{q}\right) + \arctg T_2\omega = \frac{\pi}{2} \quad (20)$$

Условие устойчивости периодического решения записываются в следующем аналитическом виде [4]

$$\left(\frac{\partial x}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial A} + \frac{\partial x}{\partial q'} \frac{\partial q'}{\partial A}\right) \frac{\partial y}{\partial \omega} - \left(\frac{\partial y}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial A} + \frac{\partial y}{\partial q'} \frac{\partial q'}{\partial A}\right) \frac{\partial x}{\partial \omega} > 0 \quad (21)$$

Подставив (17) и (18) в (21), получим

$$-\frac{\partial q}{\partial A} (k^2\tau q - kT_1 \cos(\omega\tau) + 2kT_1T_2\omega \sin(\omega\tau)) - \frac{\partial q'}{\partial A} (k^2\tau q' + kT_1 \sin(\omega\tau) + 2kT_1T_2 \cos(\omega\tau)) > 0 \quad (22)$$

В формуле (22) частные производные от коэффициентов гармонической линеаризации по амплитуде равны

$$\frac{\partial q}{\partial A} = \frac{2C}{\pi A^4} \left(\frac{2b^2 - A^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{b}{A}\right)^2}} + \frac{2m^2b^2 - A^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{mb}{A}\right)^2}} \right), \quad \frac{\partial q'}{\partial A} = -\frac{b(1-m)}{A^2} \quad (23)$$

Поэтому для выполнения условий автоколебаний (22) достаточно положительности членов, стоящих в скобках. Если чистое запаздывание отсутствует, то из (22) получается следующее условие возникновения автоколебаний

$$\frac{\partial q}{\partial A} - 2 \frac{\partial q'}{\partial A} T_2\omega > 0, \quad (24)$$

из которого следует, что чем больше постоянная времени T_2 (инерция объекта регулирования), тем больше система регулирования «предрасположена» к автоколебаниям. Если же $T_2 = 0$, то автоколебания становятся невозможными, что совпадает с известными результатами [4]. Если же коэффициент усиления объекта реагирования k либо постоянная запаздывания стремится к бесконечности, то из (22) получим

$$-\frac{\partial q}{\partial A} q - \frac{\partial q'}{\partial A} q' > 0, \quad (25)$$

что при реальной зоне нечувствительности всегда имеет место, а потому в системах с последствием при больших коэффициентах усиления всегда возникают устойчивые автоколебания.

Рассмотрим частный, но весьма распространенный случай, когда релейное звено с зоной нечувствительности не имеет гистерезиса, т.е. $m=1$. Тогда из формулы (12) получим

$$q = \frac{4C}{\pi A} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{A}\right)^2}, \quad q' = 0 \quad (26)$$

Из условий (19) и (20) получим соответственно

$$kq = T_1\omega \sqrt{1 + (T_2\omega)^2} \quad (27)$$

$$\operatorname{tg}(\omega\tau) = \frac{1}{T_2\omega}. \quad (28)$$

Условия существования устойчивых автоколебаний согласно (22) для данного случая упрощаются и принимают вид

$$kq\tau - T_1 \cos(\omega\tau) + 2T_1T_2\omega \sin(\omega\tau) > 0 \quad (29)$$

Таким образом, для реализации устойчивых автоколебаний необходимо выполнение условий (29), в противном случае устойчивых автоколебаний не будет. Они могут либо затухнуть, либо их амплитуда будет расти, и система регулирования окажется неустойчивой.

При устойчивых автоколебаниях выполняются соотношения (27) и (28). Подстановка этих выражений в условие (29) приводит к условию возникновения устойчивых автоколебаний

$$\sin(\omega\tau) + \frac{\tau}{T_2} \sqrt{1 + (T_2\omega)^2} > 0, \quad (30)$$

из которого следует, что при отсутствии запаздывания условие (30) не может быть выполнено, а потому система первого порядка всегда устойчива; чем меньше постоянная времени объекта регулирования, т.е. его инерция, тем более система регулирования подвержена автоколебательным процессам и в пределе, при T_2 стремящемся к нулю при τ , не равном нулю, как следует из условия (30), в САР возникают устойчивые автоколебания.

Из анализа формулы (23) следует, что при $b = 0,707A$ функция $\frac{\partial q}{\partial A}$ меняет знак. В этом случае, при $b > 0,707A$ для существования устойчивых автоколебаний условие (30) должно быть заменено на противоположное, но так как противоположное условие не может быть выполнено ни при каких значениях входящих в него величин, т.е. мы имеем дело со знакоположительной функцией, то автоколебания становятся невозможными.

Рассмотрим вынужденные колебания системы. Расчетная схема представлена на рисунке 3.

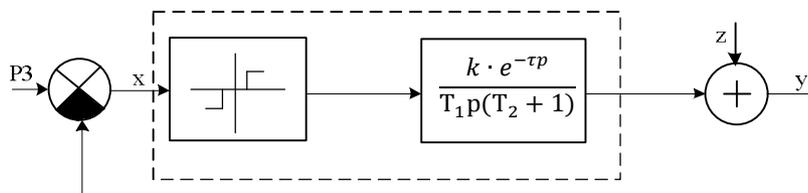


Рисунок 3 – Прохождение входного сигнала в САР забойных машин с последствием:

P_3 – задатчик уставки; x – сигнал ошибки на входе релейного блока;

z – входной сигнал нагрузки; y – выходной сигнал

Входной сигнал z поступает в систему регулирования и вызывает реакцию на возникшее возмущение в виде управляющих воздействий, поступающих с релейного блока. Если система регулирования стабилизирует нагрузку, то выходной сигнал y должен иметь меньшую амплитуду колебания, чем входной.

Примем, что

$$z = B \sin(\omega_b t) \quad (31)$$

Тогда, как следует из рисунка 3

$$y(p) = \frac{z(p)}{1 + W(p)} + \frac{P_3 W(p)}{1 + W(p)}, \quad (32)$$

где линеаризованная передаточная функция разомкнутой системы равна

$$W(p) = q \frac{ke^{-\tau p}}{T_1 p (1 + T_2 p)} \quad (33)$$

При отключении регулятора в расчетные формулы, очевидно, необходимо положить $W(p) = 0$. Поставим задачу определить условия, при которых использование регулятора эффективно, т.е. происходит в определенной мере стабилизация нагрузки, а не ее раскачка. Расчет проводим для установившегося процесса. Известными методами [4] находим выражение выходной координаты в установившемся процессе

$$y(j\omega_b) = \frac{z(j\omega_b)}{1 + W(j\omega_b)} + P_3. \quad (34)$$

Как следует из формулы (34) выходная координата в установившемся процессе характеризуется постоянной составляющей, равной заданной уставке и колебательной составляющей, обусловленной гармоническим внешним воздействием с частотой ω_b .

Для того чтобы происходило демпфирование (стабилизация) колебаний, необходимо выполнение условия

$$|1 + W(j\omega_b)| > 1, \quad (35)$$

из которого, после подстановки параметров САР, получим

$$qk - 2T_1\omega_b(\omega_b T_2 \cos(\omega_b \tau) + \sin(\omega_b \tau)) > 0 \quad (36)$$

При отсутствии запаздывания из (36) получим верхнюю частоту, которую данная система способна еще стабилизировать

$$\omega_b < \sqrt{\frac{qk}{2T_1 T_2}}. \quad (37)$$

Отсюда можно заключить, что для расширения спектра частот, стабилизируемых САР, необходимо повысить быстродействие исполнительных органов системы регулирования и ее коэффициент усиления. Если частота входного сигнала совпадает с частотой собственных автоколебаний САР, т.е. будет выполнено условие (28), то и в этом наихудшем случае еще можно достигнуть стабилизации входного сигнала, если будет выполнено соотношение

$$qk > 2T_1\omega_b \sqrt{1 + T_2^2 \omega_b^2}, \quad (38)$$

гарантирующее снижение дисперсии нагрузки при работе горной машины в автоматическом режиме.

Выводы

1. При проектировании регуляторов нагрузки горных машин достаточной исходной информацией являются данные об основной частоте нагрузки горной машины, постоянной времени T_1 и постоянной запаздывания τ .

2. Для того, чтобы система автоматического регулирования стабилизировала, а не раскачивала нагрузку, необходимо выполнение условия (37) при отсутствии чистого запаздывания, а при его наличии – должно выполняться условие (38);

3. Если условия (37) и (38) не будут выполнены, то САР будет снижать качество стабилизации нагрузки по сравнению с ручным режимом регулирования в установившемся рабочем процессе;

4. Предложенный метод гармонической линеаризации нелинейности позволяет упростить получение гармонических коэффициентов усиления по сравнению с известными методами.

Список использованной литературы

1. Попов В.М. Об устойчивости нелинейных систем с запаздывающим аргументом / В.М. Попов, А. Халанай // Автоматика и телемеханика. - 1962. - Т.23, №7. — С. 849-851.
2. Резван В. Абсолютная устойчивость автоматических систем с запаздыванием / В. Резван. – М.: Наука, 1983. – 360 с.
3. Колмоновский В.Б. Устойчивость и периодические режимы в регулируемых системах споследствием / В.Б. Колмоновский, В.Р. Носов. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
4. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1966. – 992 с.

5. Пасынков Р.Е. Построение регуляторов нагрузки для управления забойными машинами с последствием / Р.Е. Пасынков, С.В. Дубинин // Забойная автоматика: сборник научных трудов. – М.: ГУА, 1988. – 119 с.

Надійшла до редакції:
30.03.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Ковальов Є.Б.

С.В. Дубінін, В.М. Деканенко, Т.Б. Синюкова
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Оптимізація параметрів релейно-імпульсних авторегуляторів гірничих машин. Виконано системний аналіз і синтез САР навантаження для об'єктів з післядією, орієнтованою для проведення найпростіших обчислень в реальному часі на базі мікропроцесорної техніки, з метою підвищення якісних характеристик системи регулювання. На основі запропонованої методики гармонійної лінеаризації нелінійних елементів САР визначаються основні параметри САР, що забезпечують необхідний запас стійкості при автоматичній стабілізації навантаження гірничої машини.

Ключові слова: релейно-імпульсний регулятор навантаження, система автоматичного регулювання, гармонійна лінеаризація, стабілізація навантаження, передаточна функція.

S.V. Dubinin, V.N. Dekanenko, T.B. Sinyukova
Donetsk National Technical University

Optimization of the Parameters of Mining Machines Relay-Pulse Automatic Regulators. Automatic control of mining machine loads is a complex research and engineering problem. The purpose of this control is to reduce the variance of the load in all operating mining machine modes compared to manual control. Many modern controllers are nonlinear, relay or pulse devices. This complicates the design of automatic control of mining machines. As the practice of mining machines operation shows, the operation of ATS load is greatly affected by factors of regulated object's non-stationarity and the presence of items with distributed parameters (eg, hydraulic hoses, drill string, etc.). They are the cause of pure time delay. Known research works do not contain a method of engineering calculations. This makes it difficult to use them for the development and design of the load controller. Ignoring these factors leads to deterioration of mining machine dynamics in automatic mode, compared to the manual. In some cases this is the cause of regulators disabling. It should also be noted that there are no methods of estimation of amplitude-frequency characteristics of the input signal, which can be worked by this control system. For a large class of mining machines the main harmonic of input signal load and its amplitude vary widely both in transition from machine to machine, and in the process of work. It is most often associated with the change in rock mass strength. The main (first) harmonic has the most significant effect on the load variance, so the performance of ATS should be enough to stabilize it, but it should not be too much increased as in this case the system will respond to high frequency load components associated with the natural character of rock mass destruction. Therefore, regulators should have the ability to automatically adjust to the fundamental frequency of the load and its stabilization against RFI.

Keywords: relay pulse loading regulator, system of automatic control, harmonic linearization, loading stabilization, transfer function.