

Г. В. Трелю 28.7.2016 – 83. Случайно выяснилось, физически ему плохо. Автор полагает необходимым для поддержки коллеги и пользы людям оповестить нравственно здоровых об уникальных достижениях Г. В. Однако файл автора, отправленный 3.6.2016 в [econf.rae.ru](http://econf.rae.ru) (стр. 26-51 / files/5589.pdf, как продолжение страниц 1-25, опубликованных на том же сайте), уже 4.6.16 исчез из 'ожидалки', но не появился в 'открытом доступе'. И такое безобразие стало типичным. Далее впервые даны в единой подборке, электронной версии и дизайне автора ещё одна обнаруженная статья Г. В. и его изобретения по возрастающей общей их нумерации в СССР.

Журнал Материаловедение. 2004. № 10.

«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ» № 10, 2004

УДК 539.37:519.711.2

## ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ МЯГКОГО НАГРУЖЕНИЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНОГО МАТЕРИАЛА

Г. В. ТРЕЛЬ

*Рассмотрена возможность компьютерного моделирования механических характеристик упруговязкопластичного материала. Напряжения и относительные деформации считаются истинными. Скорость пластической деформации принята пропорциональной произведению упругого напряжения на абсолютную величину скорости полной деформации. Показано, что коэффициент пластичности этого материала равен обратной величине его статического предела текучести. Приведены примеры расчетных диаграмм напряжение—деформация, сопоставление которых с экспериментальными подтверждает возможность применения рассмотренной модели для воспроизведения механических характеристик ряда отмеченных материалов.*

Всем материалам твердых тел, независимо от их природы, в той или иной мере присутствуют такие механические свойства как упругость, вязкость и пластичность. Рассмотрим возможность описания механических характеристик упруговязкопластичного (УВП) материала с помощью предлагаемой математической модели. Материал принимаем: сплошным, однородным, изотропным, безынерционным, линейно-упругим, линейно-вязким, пластичным, стабильным, с равными сопротивлениями деформированию при растяжении и сжатии, находящимся в условиях изотермического, одноосного, мягкого нагружения. Напряжения и продольные относительные деформации считаем истинными. Поперечные деформации не учитываются, что относит предлагаемую модель к классу одномерных математических моделей.

Одним из современных и перспективных направлений развития механики материалов является подход, основанный на методах технической кибернетики, когда материал рассматривается как система управления с прямыми и обратными связями [1]. В качестве базовой для такой системы примем известную механическую модель, содержащую линейную вязкость, параллельную последовательному соединению линейной упругости с элементом пластичности. Подобные трехэлементные модели применялись при описании механических характеристик, в частности, бетона [2], каменной соли [3], металла [4], льда [5] и ряда других материалов.

Обычно уравнения напряжений линейной упругости Гука и линейной вязкости Ньютона представляют в виде следующих зависимостей:

$$\sigma_e(t) = E\varepsilon_e(t); \quad (1)$$

$$\sigma_v(t) = \eta \dot{\varepsilon}(t), \quad (2)$$

где  $\sigma_e(t)$ ,  $\sigma_v(t)$  — напряжения сопротивлений упругости и вязкости (далее упругое и вязкое напряжения);  $\varepsilon_e(t)$  — упругая деформация;  $\dot{\varepsilon}(t)$  — скорость полной деформации;  $E$ ,  $\eta$  — модуль упругости и коэффициент вязкости.

Однако, "в области пластической деформации мы не имели и пока не имеем общего закона, вроде закона Гука в области упругих деформаций, и должны прежде всего решить вопрос: есть ли такой общий закон?" [6]. Современная теория пластичности не отвечает на этот вопрос [7, 8].

Отметим характерные особенности поведения пластических и полных деформаций материалов, установленные экспериментально, которые должна воспроизводить рассматриваемая математическая модель.

Например, у монокристалла чистого алюминия после полной деформации порядка  $10^{-5}$  наблюдалась остаточная деформация порядка  $10^{-6}$  [9], а у отожженной малоуглеродистой стали были зафиксированы пластические деформации порядка  $10^{-5}$  [10]. Это позволяет считать, что пластические деформации возникают при самых незначительных напряжениях [11, 12]. Причем скорость этой деформации зависит от величины напряжения [11].

Необратимость пластического деформирования обычно характеризуют величиной остаточной деформации после цикла одностороннего нагружения. При переходе от нагружения к разгрузке у упругих деформаций направление процесса развития деформации меняется на обратное, а у пластических деформаций оно

сохраняется [13]. Однако необратимость пластической деформации не абсолютна. Эксперименты, например, с каменной солью [14] и медью [15], показали, что при реверсе нагружения у этих материалов наблюдается принудительная обратимость пластической деформации. В частности, у меди при симметричном цикле мягкого растяжения-сжатия наблюдался эффект полной обратимости, когда результирующая остаточная деформация практически отсутствовала.

Пластические деформации, как и упругие, считаются склерономными, не зависящими от фактора времени [16, 17]. Вязкость относится к реономным свойствам, поэтому у вязких материалов наблюдается запаздывание деформации от действующего напряжения. У сталей время задержки уменьшается со снижением скорости нагружения [18]. Эта задержка определяется величиной постоянной времени ретардации  $T_r = \eta E^{-1}$  [19]. Ретардация, иногда называемая упругим последствием [20] или кратковременной ползучестью [21], проявляется не только в начале нагружения, но и после достижения постоянного напряжения в виде процесса некоторого постепенного увеличения полной деформации, а после полной разгрузки — в виде некоторого постепенного уменьшения остаточной деформации. Подобные явления наблюдались, например, у древесины [22], известняка [23], титанового сплава [24] и малоуглеродистой стали [25]. Следовательно, у моделируемого УВП материала в режиме мягкого нагружения при постоянном внешнем напряжении или при полной разгрузке после окончания процессов ретардации полная деформация

материала должна сохраняться неизменной сколь угодно долго.

В процессе нагружения пластические деформации могут достигать величин упругих деформаций и затем неограниченно превосходить их вплоть до бесконечности [26]. При больших пластических деформациях процесс деформирования называют пластическим течением, которое, в отличие от жидкостного, возникает и развивается лишь в процессе увеличения нагрузки [27, 28]. В режиме мягкого нагружения незначительному росту действующего напряжения будет соответствовать существенное увеличение деформации. Такие диаграммы с пластическим течением можно достаточно точно аппроксимировать известными экспоненциальными зависимостями [9]. Уменьшение скорости нагружения снижает уровень напряжений таких диаграмм [29]. Предельную диаграмму, полученную при бесконечно малых скоростях нагружения, принято называть статической, а уровень напряжения ее асимптоты — статическим пределом текучести материала [30].

Уравнение пластичности материала представим зависимостью

$$\dot{\varepsilon}_p(t) = P \sigma_e(t) |\dot{\varepsilon}(t)|, \quad (3)$$

где  $\dot{\varepsilon}_p(t)$  — скорость пластической деформации;  $|\dot{\varepsilon}(t)|$  — абсолютная величина скорости полной деформации;  $P$  — коэффициент пластичности материала.

Работоспособность уравнения пластичности (3) ранее была проверена методами аналогового моделирования механических характеристик твердых тел [31] и компьютерного моделирования, в частности, диаграммы напряжение—деформация мягкого циклического нагружения алюминия [32].

Дополним уравнения упругости (1), вязкости (2) и пластичности (3) следующими уравнениями напряжений и деформаций УВП материала:

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_e(t) + \sigma_v(t); & \dot{\varepsilon}(t) &= \dot{\varepsilon}_e(t) + \dot{\varepsilon}_p(t); \\ \varepsilon(t) &= \int \dot{\varepsilon}(t) dt; & \varepsilon_e(t) &= \int \dot{\varepsilon}_e(t) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\sigma(t)$  — внешнее напряжение нагружения;  $\varepsilon(t)$  — полная деформация;  $\dot{\varepsilon}_e(t)$  — скорость упругой деформации.

Простейшие преобразования системы определяющих уравнений (1)—(4) позволяют при-

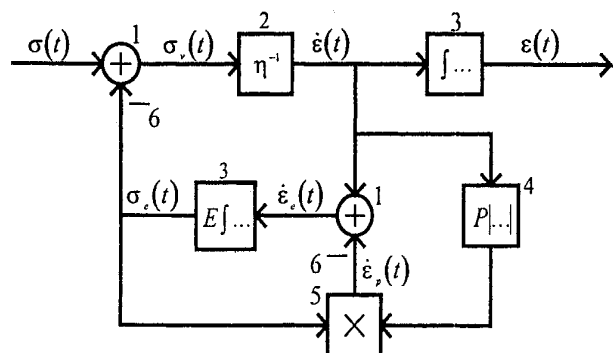


Рис. 1. Структурная схема математических операций одномерной математической модели мягкого нагружения УВП материала: 1 — алгебраическое суммирование; 2 — умножение на коэффициент; 3 — интегрирование; 4 — выделение абсолютной величины; 5 — перемножение; 6 — изменение знака на противоположный

вести их к виду, удобному для компьютерного моделирования:

$$\begin{aligned} \sigma_v(t) &= \sigma(t) - \sigma_e(t); \quad \dot{\varepsilon}(t) = \eta^{-1} \sigma_v(t); \\ \varepsilon(t) &= \int \dot{\varepsilon}(t) dt; \quad \dot{\varepsilon}_e(t) = \dot{\varepsilon}(t) - \dot{\varepsilon}_p(t); \\ \sigma_e(t) &= E \int \dot{\varepsilon}_e(t) dt; \quad \dot{\varepsilon}_p(t) = P \sigma_e(t) |\dot{\varepsilon}(t)|. \end{aligned} \quad (5)$$

Структурная схема этой одномерной модели представлена на рис. 1.

Заметим, что предложенная зависимость скорости пластической деформации (3) непосредственно отражает некоторые из отмеченных особенностей поведения пластической деформации. Скорость пластической деформации зависит от упругого напряжения  $\sigma_e(t)$ . В начале нагружения сколь угодно малой величине  $\sigma_e(t)$  соответствует малое приращение полной деформации того же порядка, поэтому им будет соответствовать малое приращение пластической деформации второго порядка. При переходе от нагружения к разгрузке знак  $\sigma_e(t)$  не меняется, поэтому в соответствии с (3) пластическая деформация в процессе разгрузки продолжает накапливаться. После окончания разгрузки, в случае реверса нагружения, в связи с изменением знака  $\sigma_e(t)$ , знак  $\dot{\varepsilon}_p(t)$  меняется на обратный, что отражает отмеченную выше принудительную обратимость пластической деформации.

Определяющие уравнения позволяют получить уравнение статической диаграммы  $\sigma_e - \varepsilon$  одностороннего нагружения. Пусть, например,  $\sigma_e(t) > 0$ ,  $\dot{\varepsilon}(t) > 0$  и  $\varepsilon(t) > 0$ . Дифференцирование  $\sigma_e(t)$  (1) и подстановка выражений  $\dot{\varepsilon}_e(t)$  (5) и  $\dot{\varepsilon}_p(t)$  (3) позволяют получить  $\dot{\sigma}_e(t) = E[1 - P\sigma_e(t)]\dot{\varepsilon}(t)$ , что после интегрирования при  $\sigma_e(0) = 0$  и  $\varepsilon(0) = 0$  дает  $\sigma_e(t) = P^{-1}\{1 - \exp[-PE\varepsilon(t)]\}$ . Следовательно, с ростом полной деформации упругое напряжение экспоненциально приближается к асимптоте  $P^{-1} = \sigma_{ss}$  — статическому пределу текучести материала, откуда коэффициент пластичности  $P = \sigma_{ss}^{-1}$ .

Результаты компьютерного моделирования показали, что предлагаемая математическая модель (5) отражает все перечисленные особенности поведения полных и пластических деформаций рассматриваемого УВП материала. Модели набирались по схеме рис. 1.

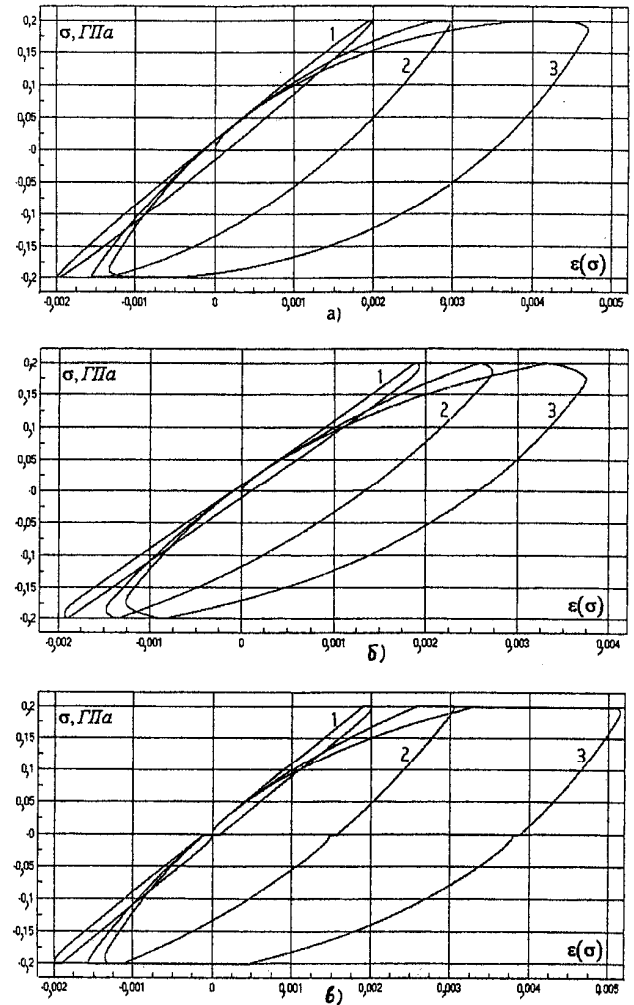


Рис. 2. Диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  циклических симметричных синусоидальных (а), треугольных (б) и трапецидальных (в) нагружений

Примеры компьютерных диаграмм  $\sigma - \varepsilon$  представлены на рис. 2 и 3. Моделировалось: по полтора цикла симметричных синусоидальных нагружений с периодами 800 с (рис. 2, а, 3, а, 3, б, кривая 3), 40 с (рис. 3, б, кривая 2) и 8 с (рис. 3, б, кривая 1); по полтора цикла симметричных треугольных нагружений с периодами 800 с (рис. 2, б); по одному циклу симметричных трапецидальных нагружений с периодами 1200 с (рис. 2, в); по два цикла асимметричных треугольных нагружений с периодами 400 с (рис. 3, в). Во всех случаях после этих циклов при нулевом напряжении давалась выдержка не менее 100 с. Амплитуды скоростей синусоидальных нагружений составляли 1,5708 (рис. 2, а, 3, а, 3, б, кривая 3); 31,416 (рис. 3, б, кривая 2) и 157,08 МПа · с<sup>-1</sup> (рис. 3, б, кривая 1), а постоянные скорости треугольных (рис. 2, б, 3, в) и трапецидальных (рис. 2, в) нагружений

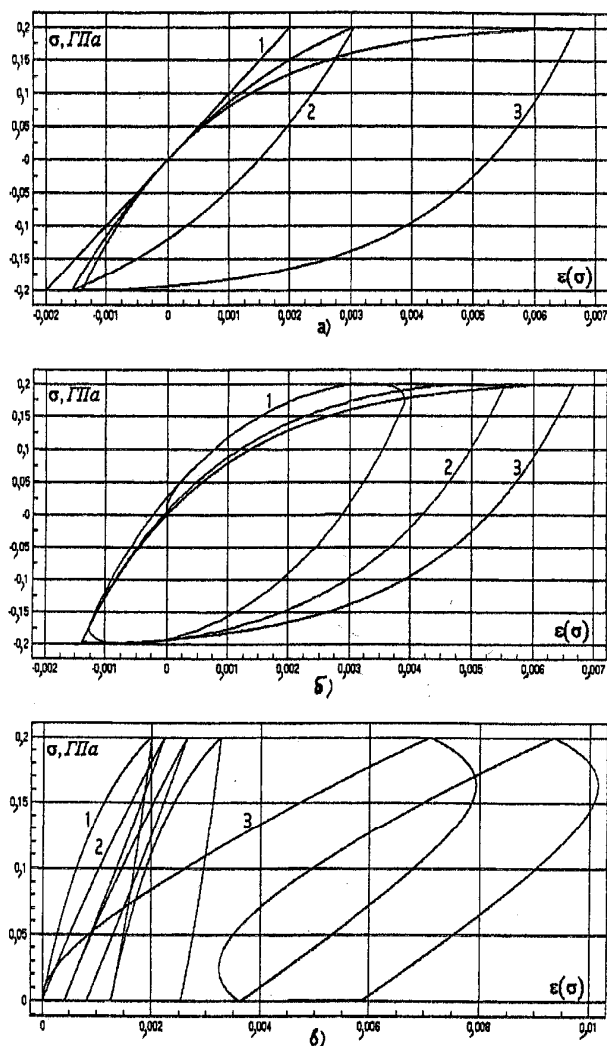


Рис. 3. Диаграммы  $\sigma$ — $\varepsilon$  циклических симметричных синусоидальных (а, б) и асимметричных треугольных (в) нагружений

приняты по  $1,0 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$ . Амплитуды напряжений соответствуют диаграммам.

Диаграммы рис. 2 рассчитывались при  $E = 100 \text{ ГПа}$ ,  $\eta = 1000 \text{ ГПа} \cdot \text{с}$ ,  $T_r = 10 \text{ с}$  и  $P = 0$  (1);  $3,0$  (2);  $4,8$  (3)  $\text{ГПа}^{-1}$ . Петли рис. 2, а (1), б (1), в (1) по существу являются упругими гистерезисами упруговязкого материала. При этих параметрах форма диаграммы существенно зависит от вида нагружения. С уменьшением вязкости до  $\eta = 20 \text{ ГПа} \cdot \text{с}$  различие диаграмм существенно снижается, поэтому на рис. 3, а диаграммы приведены только для синусоидальных нагружений при  $E = 100 \text{ ГПа}$  и  $P = 0$  (1);  $3,0$  (2)  $4,8$  (3)  $\text{ГПа}^{-1}$ .

Для последнего случая нагружения при  $P = 4,8 \text{ ГПа}^{-1}$  была проведена оценка влияния на форму диаграмм изменений амплитуд скоростей этих нагружений. Результаты представлены на рис. 3, б. С уменьшением скоростей нагружения наклон начальных ветвей диа-

грамм снижается и диаграммы приближаются к статической.

Диаграммы рис. 2, 3, а и б подтверждают, что рассматриваемая модель воспроизводит эффект полной принудительной обратимости пластической деформации, наблюдавшийся у различных материалов при циклическом симметричном мягком нагружении.

Расчет диаграмм рис. 3, в проводился при  $E = 200$  (1);  $100$  (2);  $25$  (3)  $\text{ГПа}$ ;  $\eta = 40$  (1);  $20$  (2);  $1000$  (3)  $\text{ГПа} \cdot \text{с}$ ;  $T_r = 0,2$  (1, 2);  $40$  (3)  $\text{с}$ ;  $P = 4,0$  (1);  $1,0$  (2);  $2,0$  (3)  $\text{ГПа}^{-1}$ . Они отражают процессы накопления пластических деформаций и влияние на форму диаграмм совместных изменений параметров упругости, вязкости и пластичности моделируемого материала при асимметричном треугольном нагружении.

Сопоставление компьютерных диаграмм (см. рис. 3, б (2, 3), в (1, 2, 3)) с экспериментальными, соответственно, для меди [33], двух алюминиевых сплавов [34, 35], углерода [36] и известняка [23] позволяет убедиться в их вполне приемлемом для инженерной практики качестве соответствия.

Таким образом, рассмотренная одномерная математическая модель УВП материала может быть применена при компьютерном моделировании механических характеристик ряда разнородных материалов твердых тел.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коларов Д., Балтов А., Бончева Н. Механика пластических сред / Пер. с болг. М.: Мир. 1979. 284 с.
2. Шейкин А. Е., Николаев В. Д. Об упругопластических свойствах бетона при растяжении // Бетон и железобетон. 1959. № 9. С. 396—402.
3. Проскуряков Н. М., Пермяков Р. С., Черников А. К. Физико-механические свойства соляных пород. Л.: Недра. 1973. С. 119—120.
4. Харт Е. Уравнения состояния для неупругой деформации металлов // Теоретические основы инженерных расчетов. 1976. Т. 98. Сер. D. № 3. С. 1—11.
5. Вялов С. С., Максимьяк Р. В., Разбегин В. Н. Деформирование и разрушение льда как анизотропного тела // Проблемы механики грунтов и инженерного мерзлотоведения. М.: Стройиздат. 1990. С. 16—24.
6. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Т. 4. Томск: Полиграфиздат. 1947. 511 с.
7. Лихачев В. А., Малинин В. Г. Структурно-аналитическая теория прочности. СПб.: Наука. 1993. С. 7—12.
8. Быковцев Г. И., Ивлев Д. Д. Теория пластичности. Владивосток: Дальнаука. 1998. С. 9—10.
9. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 1 / Пер. с англ. М.: Наука. 1984. С. 201, 163.
10. Макклиток Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов / Пер. с англ. М.: Мир. 1970. С. 209.
11. Френкель Я. И. Теория твердых и жидких тел. М.-Л.: ГТТИ. 1934. 82С.
12. Надаи А. Пластичность. Механика пластического состояния / Пер. с англ. М.-Л.: ОНТИ. 1936. 26 с.

13. **Бажант З.** Эндохронная теория неупругости и инкрементальная теория пластичности // *Механика деформируемых твердых тел. Направления развития* / Пер. с англ. М.: Мир. 1983. 194 с.
14. **Гарбер Р. И.** Возвратное скольжение при пластической деформации каменной соли // *ДАН.* 1948. Т. 63. № 3. С. 235–237.
15. **Ровинский Б. М., Рыбакова Л. М.** Обратимость пластической деформации при повторном растяжении и сжатии // *ФММ.* 1970. Т. 29. Вып. 5. С. 1081–1087.
16. **Ильюшин А. А.** Пластичность. Основы общей математической теории. М.: АН СССР. 1963. 101 с.
17. **Гохфельд Д. А., Садаков О. С.** Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. М.: Машиностроение. 1984. 124 с.
18. **Мохель А. Н., Салганик Р. Л., Христианович С. А.** Теоретическое описание запаздывания пласт. деформирования сталей // *Пластичность и разрушение твердых тел.* М.: Наука. 1988. С. 145–157.
19. **Рейнер М.** Реология / Пер. с англ. М.: Наука. 1965. С. 15, 60.
20. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов. Ч. 1. Изд. 3-е. М.: Машиностроение. 1974. 316 с.
21. **Милейко С. Т., Работнов Ю. Н.** Некоторые результаты экспериментального исследования кратковременной ползучести при одноосном растяжении // *ЖПМТФ.* 1966. № 5. С. 148–155.
22. **Иванов Ю. М.** Деформации древесины под действием повторной нагрузки при сжатии вдоль волокон // *Вопросы прочности и изготовления деревянных конструкций.* М.: Стройиздат. 1952. С. 7–47.
23. **Мохначев М. П.** Усталость горных пород. М.: Наука. 1979. 61 с.
24. **Викторов В. В., Мосолов А. Б.** О временных эффектах при нагружении и разгрузке с повышенными скоростями // *Проблемы прочности.* 1992. № 7. С. 3–10.
25. **Мельшанов А. Ф., Суворова Ю. В., Хазанов С. Ю.** Экспериментальная проверка определяющего уравнения для металлов при нагружении и разгрузке // *Изв. АН СССР. МТТ.* 1974. С. 166–170.
26. **Клюшников В. Д.** Математическая теория пластичности. М.: Изд-во МГУ. 1979. С. 8.
27. **Конобеевский С. Т.** Физические основы прочности // *Вестник АН СССР.* 1955. Т. 25. № 7. С. 15–22.
28. **Новожилов В. В.** Пути развития теории деформирования поликристаллов // *Нелинейные модели и задачи механики деформируемого твердого тела.* М.: Наука. 1984. С. 14.
29. **Соснин О. В., Торшенов Н. Г.** Сжатие и выпучивание стержней при монотонно возрастающей нагрузке в условиях ползучести // *ЖПМТФ.* 1967. № 5. С. 140–144.
30. **Работнов Ю. Н., Суворова Ю. В.** Наследственные эффекты при деформировании металлов // *Успехи механики деформируемых сред.* М.: Наука. 1975. С. 470–477.
31. **Трель Г. В.** Устройство для моделирования механических характеристик твердого тела // *Авт. свид. СССР № 1833862. Изобретения.* 1993. № 3. 29 с.
32. **Трель Г. В.** О некоторых законах механики деформируемого твердого тела // *Прочность и пластичность.* Тр. 9-й конференции. Т. 2. М.: ИПМех РАН. 1996. С. 166–171.
33. **Bray A.** Esperienze sul fenomeno d'isteresi meccanica del rame // *L'Ingenere.* 1959. A. 33. N 6. P 517–522.
34. **Forrest P. G., Tapsell H. J.** Some experiments on the alternating stress fatigue // *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers.* 1954. V. 168. N. 29 P. 763–772.
35. **Abel A., Ham R. K.** The cyclic behavior of crystals of aluminium-4 wt % cooper // *Acta Metallurgica.* 1966. V. 14. N 11. P. 1489–1494.
36. **Мидгли (Midgley J. W.), Тип (Teer D. G.).** Исследование природы трения и механизма износа углерода // *Техническая механика.* Сер. D. 1963. Т. 85. № 4. С. 11–20.



Союз Советских  
Социалистических  
Республик



Государственный комитет  
СССР  
по делам изобретений  
и открытий

# О П И С А Н И Е ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(11) 989564

(61) Дополнительное к авт. свид-ву -

(22) Заявлено 24.06.81. (21) 3307508/18-24

с присоединением заявки № -

(23) Приоритет -

Опубликовано 15.01.83. Бюллетень № 2

Дата опубликования описания 15.01.83.

(51) М. Кл.<sup>3</sup>

G 06 G 7/48

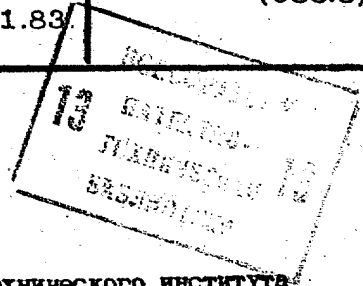
(53) УДК 681.333  
(088.8)

(72) Авторы  
изобретения

Г. В. Трель и О. В. Косорукова

(71) Заявитель

Ковровский филиал Владимирского политехнического института



## (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ

Изобретение относится к аналоговой вычислительной технике и предназначено для моделирования механических систем с парами трения, силы трения которых зависят от напряжения и величины относительной скорости скольжения элементов пары трения.

Известно устройство для моделирования сухого трения, содержащее резисторы и диоды в качестве нелинейных и ключевых элементов и операционный усилитель, воспроизводящее нелинейную зависимость, подобную "падающей" характеристике зависимости силы трения от скорости относительного скольжения элементов пары трения [1].

Недостатком этого устройства является то, что нелинейные характеристики используемых диодов воспроизводят только достаточно узкий класс нелинейных зависимостей, имеющих место при трении. Это отрицательно сказывается на точности моделирования из-за малой точности аппро-

ксимации зависимостей сил трения от скорости скольжения.

Наиболее близким по технической сущности к изобретению является устройство, содержащее усилители, схему для воспроизведения абсолютной величины, инверторы, электронный коммутатор, квадрататор, цепи ограничения и зоны нечувствительности [2].

Недостатком этого устройства является низкая точность его работы из-за большого числа элементов и связей между ними.

Цель изобретения - повышение точности моделирования, упрощение устройства и расширение функциональных возможностей его применения.

Указанная цель достигается тем, что в устройство для моделирования силы трения, содержащее инвертор, блок ограничения, первый и второй входы которого соединены с выходами соответственно первого источника положительного опорного напряжения и первого источника отрица-

тельного опорного напряжения, первый и второй блоки задания зоны нечувствительности, вторые источники положительного и отрицательного опорных напряжений и сумматор, первый вход которого соединен с выходом блока ограничения, введены третий и четвертый блоки задания зоны нечувствительности и третьи источники положительного и отрицательного опорных напряжений, выходы которых подключены соответственно к первым входам третьего и четвертого блоков задания зоны нечувствительности, выходы которых соединены соответственно с вторым и третьим входами сумматора, вход которого является выходом устройства, а вход подключен к вторым входам третьего и четвертого блоков задания зоны нечувствительности и к входу инвертора, выход которого соединен с третьим входом блока ограничения и с первыми входами первого и второго блоков задания зоны нечувствительности, вторые входы которых соединены соответственно с выходом второго источника положительного опорного напряжения и с выходом второго источника отрицательного опорного напряжения, выходы первого и второго блоков задания зоны нечувствительности соединены соответственно с четвертым и пятым входами сумматора.

На чертеже схематически изображено предлагаемое устройство.

Устройство содержит инвертор 1, блоки 2 и 3 задания зоны нечувствительности, сумматор 4, блок 5 ограничения, блоки 6 и 7 задания зоны нечувствительности, источники 8, 9 и 10 положительного напряжения и источники 11, 12 и 13 отрицательного опорного напряжения.

Устройство работает следующим образом.

Напряжение со входа устройства, пропорциональное скорости относительного скольжения элементов моделируемой пары трения, поступает через инвертор 1 на первый вход сумматора 4 с ограничением, задаваемым блоком 5 ограничения, первый и второй входы которого подключены к источникам 12 и 9 разнополярных напряжений, пропорциональных экстремальному значению силы трения в зоне граничного трения, на четвертый и пятый входы сумматора 4 через блоки 2 и 3 задания зоны нечувствительности с опорными напряжениями от источников 11 и 8 разнополярных напряжений, пропорциональными скорости конца зоны граничного трения, одновременно входное напряже-

ние через блоки 6 и 7 задания зоны нечувствительности с опорными напряжениями от источников 13 и 10 разнополярных напряжений, пропорциональными минимальному значению силы трения в зоне до начала граничного трения, подается на второй и третий входы сумматора 4. В результате алгебраического суммирования поступивших напряжений на выходе сумматора 4, т. е. на выходе устройства, вырабатывается напряжение, пропорциональное силе трения и воспроизводящее "падающий" характер зависимости силы трения от скорости скольжения в режимах полусухого, граничного и полужидкостного трения. Переход от "падающей" характеристики трения к "горбатой" обеспечивается простым переключением первого входа сумматора 4 с выхода инвертора 1 на вход устройства по скорости относительного скольжения.

Указанное выполнение устройства, сокращая число используемых элементов и связей, всегда имеющих определенные погрешности, по сравнению с прототипом, принятым за базовый образец, дает возможность с более высокой точностью получить нелинейные зависимости силы трения от скорости относительного скольжения. Кроме того, настройкой резисторов можно отразить зависимости в режимах сухого или жидкостного трения, а также при их совокупности, т. е. устройство отражает большинство известных зависимостей силы трения от скорости относительного скольжения элементов модулируемой пары трения, что дополнительно повышает точность моделирования механических систем с парами трения, силы трения которых являются функциями скорости скольжения, и расширяет функциональные возможности применения устройства. Это позволяет моделировать механические системы с парами трения на наиболее простых и, следовательно, на наиболее дешевых аналоговых вычислительных машинах.

#### Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

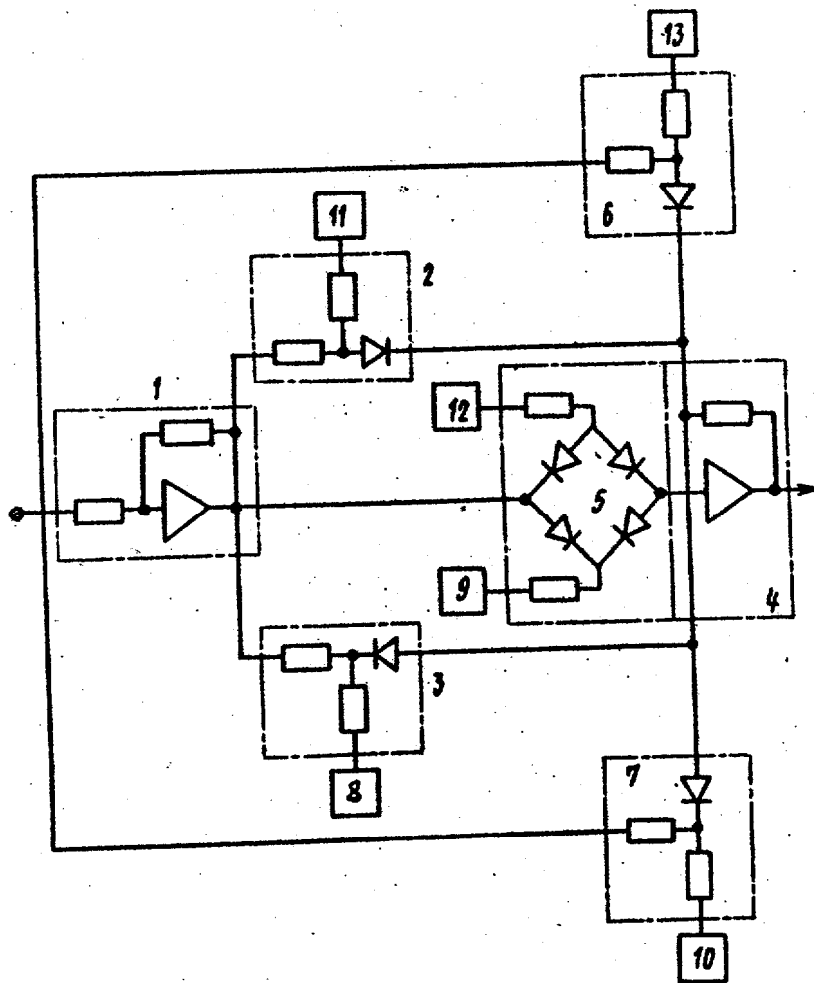
Устройство для моделирования силы трения, содержащее инвертор, блок ограничения, первый и второй входы которого соединены с выходами соответственно первого источника положительного опорного напряжения и первого источника отрицательного опорного напряжения, первый и второй блоки задания зоны нечувствительности, вторые источники по-

ложительного и отрицательного опорных напряжений и сумматор, первый вход которого соединен с выходом блока ограничения, отличающееся тем, что, с целью повышения точности, в него введены третий и четвертый блоки задания зоны нечувствительности и третьи источники положительного и отрицательного опорных напряжений, выходы которых подключены соответственно к первым входам третьего и четвертого блоков задания зоны нечувствительности, выходы которых соединены соответственно с вторым и третьим входами сумматора, выход которого является выходом устройства, а вход подключен к вторым входам третьего и четвертого блоков задания зоны нечувствительности и к входу инвертора, выход которого соеди-

нен с третьим входом блока ограничения и с первыми входами первого и второго блоков задания зоны нечувствительности, вторые входы которых соединены соответственно с выходом второго источника положительного опорного напряжения и с выходом второго источника отрицательного опорного напряжения, выходы первого и второго блоков задания зоны нечувствительности соединены соответственно с четвертым и пятым входами сумматора.

Источники информации, принятые во внимание при экспертизе

1. Авторское свидетельство СССР № 211885, кл. G 06 G 7/48, 1967.
2. Авторское свидетельство СССР № 324636, кл. G 06 G 7/68, 1970 (прототип).



ВНИИПИ Заказ 11132/69 Тираж 704 Подписное

Филиал ППП "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4





Государственный комитет  
СССР  
по делам изобретений  
и открытий

# О П И С А Н И Е ИЗОБРЕТЕНИЯ

## К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(11) 1003109

(61) Дополнительное к авт. свид-ву -

(22) Заявлено 13.07.81 (21) 3314648/18-24

с присоединением заявки № -

(23) Приоритет -

Опубликовано 07.03.83. Бюллетень №9

Дата опубликования описания 07.03.83.

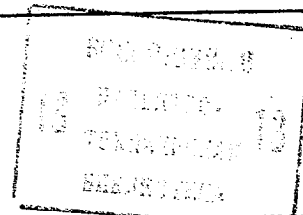
(51) М. Кл.<sup>3</sup>

G 06 G 7/48

(53) УДК 681.333  
(088.8)

(72) Автор  
изобретения

Г. В. Трель



(71) Заявитель

Ковровский филиал Владимирского политехнического института

### (54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МУФТ ТРЕНИЯ

1

Изобретение относится к аналого-вой вычислительной технике и предназначено для моделирования механических систем с предохранительными муфтами трения с учетом зависимости их коэффициентов трения от скорости относительного скольжения частей муфты и от продолжительностей периодов относительных скольжения и покоя этих частей (полумуфт).

Известно устройство для моделирования кулонова трения, содержащее источник напряжения, пропорционального скорости относительного перемещения в трущейся паре, сумматор, первую диодную мостовую схему с инвертором, представляющую двухполупериодный двухполярный выпрямитель и вторую диодную мостовую схему с двумя резисторами [1].

Недостатком этого устройства является то, что оно не учитывает зависимости силы трения от относительного перемещения элементов пары трения в пределах переменной зоны предельного смещения, определяемой величиной нормальной внешней нагрузки.

Наиболее близким по технической сущности к изобретению является уст-

2

ройство для моделирования муфт трения, содержащее интегратор, блок ограничения, сумматоры, инвертор, масштабные резисторы, двухполупериодный выпрямитель, источники постоянного напряжения и блок деления [2].

Недостатком устройства является то, что оно не учитывает зависимости коэффициента трения муфты от продолжительностей периодов относительных скольжения и покоя ее частей.

Цель изобретения - расширения функциональных возможностей применения устройства и повышение точности моделирования механических систем с предохранительными муфтами трения.

Указанная цель достигается тем, что в устройстве для моделирования муфт трения, содержащее интегратор, выход которого является выходом устройства, первый и второй входы которого подключены соответственно к первому и второму входам сумматора, выход которого соединен с входом двухполупериодного выпрямителя, выход которого подключен к первым входам соответственно второго и третьего сумматоров, вторые входы которых соединены соответственно с вы-

ходами первого и второго источников постоянного напряжения, выход второго сумматора подключен к первому входу блока деления, выход которого соединен с третьим входом третьего сумматора, выход которого подключен к первому входу блока ограничения и к входу инвертора, выход которого соединен с вторым входом блока ограничения, первый и второй выходы которого подключены соответственно к выходу и входу интегратора, вход которого соединен с первыми выводами первого и второго масштабных резисторов, вторые выводы которых соединены соответственно с первым и вторым входами устройства, введены дополнительные интегратор и сумматор, третий и четвертый источники постоянного напряжения и релейный усилитель, выход которого подключен к входу дополнительного интегратора, выход последнего соединен с первым входом дополнительного сумматора, выход которого подключен к второму входу блока деления, выходы третьего и четвертого источников постоянного напряжения соединены соответственно с первым входом релейного усилителя и с вторым входом дополнительного сумматора, третий вход которого подключен к входу второго источника постоянного напряжения, выход двухполупериодного выпрямителя соединен с вторым входом релейного усилителя.

На чертеже представлена схема предлагаемого устройства.

Устройство содержит интегратор 1, блок 2 ограничения, сумматоры 3-6, инвертор 7, двухполупериодный выпрямитель 8, блок 9 деления, релейный усилитель 10, интегратор 11, источники 12-15 постоянных напряжений, масштабные резисторы 16 и 17, конденсаторы 18 и 19, резисторы 20, диоды 21 и операционные усилители 22.

Устройство работает следующим образом.

Разнополярные напряжения, пропорциональные угловым скоростям  $\omega_1$  и  $\omega_2$  частей (полумуфта) моделируемой предохранительной муфты одновременно поступают через масштабные резисторы 16 и 17 на входы интегратора 1 и сумматора 6. С выхода последнего напряжение, пропорциональное скорости относительного скольжения частей муфты, подается через двухполупериодный однополярный выпрямитель 8 в виде напряжения, пропорционального модулю скорости скольжения частей муфты, на входы релейного усилителя 10 и сумматоров 5 и 4. С выхода релейного усилителя 10 скачкообразно изменяющееся напряжение, пропорциональное максимальному изменению коэффициента статического трения при большой длительности периода сколь-

жения, определяемое источником 14, через интегратор 11 после суммирования на сумматоре 3 с напряжениями, пропорциональными максимальному коэффициенту статического трения при большой длительности периода покоя и минимальному коэффициенту трения в период скольжения, определяемыми источниками соответственно 13 и 12, поступает на вход блока 9 деления. На второй вход этого блока поступает напряжение с выхода сумматора 5, представляющее собой сумму напряжений пропорционального модулю скорости относительного скольжения частей муфты и соответствующего допустимой минимальной величине делителя на входе блока 9 деления. Последнее напряжение определяется источником 15. Напряжение с выхода блока 9 деления после суммирования на сумматоре 4 с напряжениями от источника 12 и выхода выпрямителя 8 и последующего инвертирования на инверторе 7 в виде двух разнополярных опорных напряжений, пропорциональных изменяющимся коэффициентам трения муфты, поступает через блок 2 ограничения на инвертор 1. Коэффициент усиления последнего выбирается пропорциональным коэффициенту жесткости моделируемой муфты трения. В результате на выходе интегратора 1, т.е. на выходе устройства, вырабатывается напряжение, пропорциональное моменту передаваемому муфтой, с учетом зависимости ее коэффициента трения от скорости относительного скольжения и продолжительностей периодов относительного скольжения и покоя частей муфты.

Предложенный порядок связей элементов, выполненный описанным путем, позволяет при моделировании механических систем с предохранительными муфтами трения учесть зависимости коэффициентов трения муфт от скорости относительного скольжения частей муфты и от продолжительностей периодов относительных скольжения и покоя этих частей. Учет указанных зависимостей коэффициента трения муфт от скольжения и покоя расширяет функциональные возможности применения устройства и повышает точность моделирования механических систем с предохранительными муфтами трения, по сравнению с прототипом.

#### Формула изобретения

Устройство для моделирования муфт трения, содержащее интегратор, выход которого является выходом устройства, первый и второй входы которого подключены соответственно к первому и второму входам первого сумматора, выход последнего соединен с входом

двухполупериодного выпрямителя, выход которого подключен к первым входам соответственно второго и третьего сумматоров, вторые входы которых соединены соответственно с выходами первого и второго источников постоянного напряжения, выход второго сумматора подключен к первому входу блока деления, выход которого соединен с третьим входом третьего сумматора, выход последнего подключен к первому входу блока ограничения и к входу инвертора, выход которого соединен с вторым входом блока ограничения, первый и второй выходы которого подключены соответственно к выходу и входу интегратора, вход последнего соединен с первыми выводами первого и второго масштабных резисторов, вторые выводы которых соединены соответственно с первым и вторым входами устройства, отличающегося тем, что, с целью повышения точности, в него введены дополнительные интегратор и сумматор,

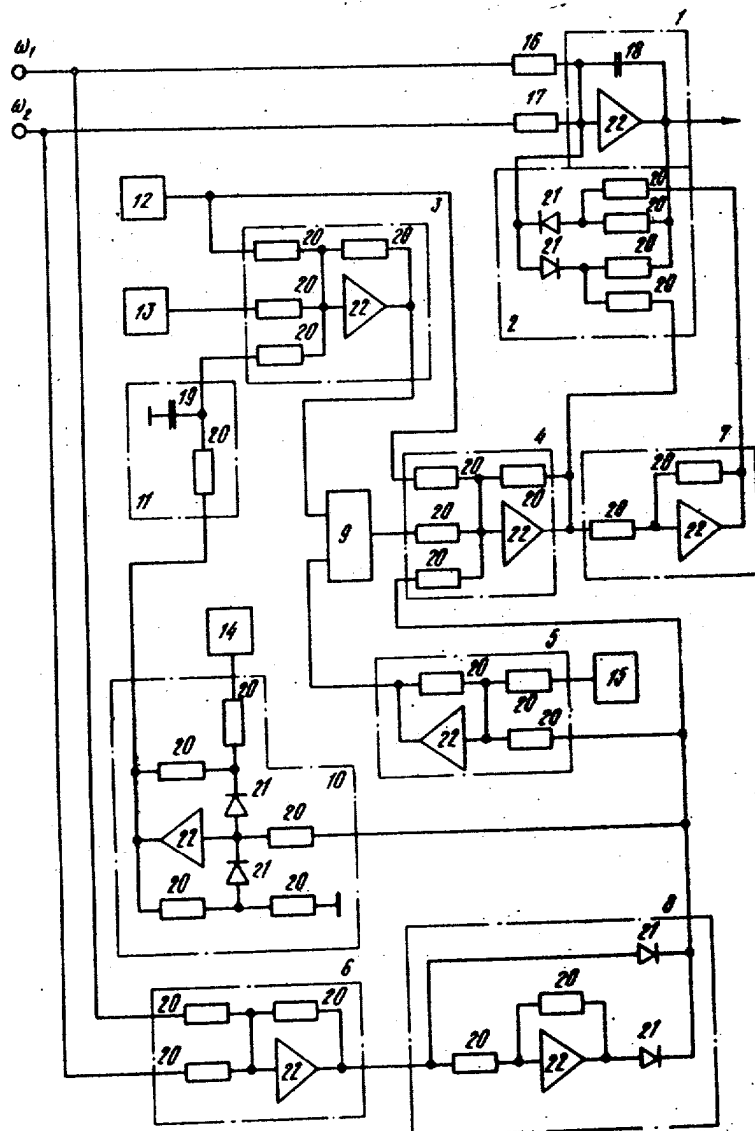
третий и четвертый источники постоянного напряжения и релейный усилитель, выход которого подключен к входу дополнительного интегратора, выход последнего соединен с первым входом дополнительного сумматора, выход которого подключен к второму входу блока деления, выходы третьего и четвертого источников постоянного напряжения соединены соответственно с первым входом релейного усилителя с вторым входом дополнительного сумматора, третий вход которого подключен к выходу второго источника постоянного напряжения, выход двухполупериодного выпрямителя соединен с вторым входом релейного усилителя.

Источники информации,

принятые во внимание при экспертизе

1. Авторское свидетельство СССР № 456280, кл. G 06 G 7/48, 1973.

2. Авторское свидетельство СССР № 483678, кл. G 06 G 7/48, 1972 (прототип).



ВНИИПИ Заказ 1565/34  
Тираж 704 Подписное

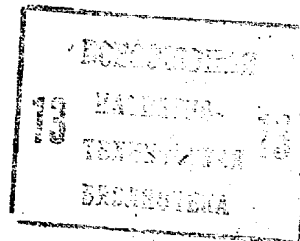
Филиал ППП "Патент",  
г. Ужгород, ул. Проектная,



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

## К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ



- (21) 3373606/18-24  
(22) 30.12.81  
(46) 30.04.83. Бюл. № 16  
(72) Г.В.Трель и В.В.Маркеев  
(71) Филиал Владимирского политехнического института в г.Коврове  
(53) 681.333(088.8)  
(56) 1. Авторское свидетельство СССР № 260292, кл. G 06 G 7/48, 1968.  
2. Авторское свидетельство СССР № 456280, кл. G 06 G 7/48, 1973 (прототип).

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ (ЕГО ВАРИАНТЫ).

(57) 1. Устройство для моделирования коэффициента трения, содержащее диодный выпрямительный мост, в диагональ которого включен инвертор, выводы диодного выпрямительного моста подключены к управляющим входам соответственно первого и второго элементов ограничения, информационный вход первого из которых соединен с выходом первого источника опорного напряжения, выходы первого и второго элементов ограничения подключены соответственно к первому и второму входам сумматора, выход которого является выходом устройства, вход которого соединен с соответствующим выводом диодного выпрямительного моста, о т л и ч а ю щ е е с я тем, что, с целью повышения точности, в него введены дополнительный инвертор, второй, третий и четвертый источники опорного напряжения, блок ограничения и интегратор, выход которого подключен непосредственно к третьему входу сумматора, а через дополнительный инвертор - к информационному входу второго элемента ограничения, управляющий вход которого соединен с управляющим входом блока ограничения, первый и

второй информационные входы которого подключены к выходам соответственно второго и третьего источников опорного напряжения, выход блока ограничения соединен с первым входом интегратора, второй вход которого подключен к выходу четвертого источника опорного напряжения.

2. Устройство для моделирования коэффициента трения, содержащее диодный выпрямительный мост, в диагональ которого включен инвертор, выводы диодного выпрямительного моста подключены к управляющим входам соответственно первого и второго элементов ограничения, информационный вход первого из которых соединен с выходом первого источника опорного напряжения, выходы первого и второго элементов ограничения подключены соответственно к первому и второму входам сумматора, выход которого является выходом устройства, вход которого соединен с соответствующим выводом диодного выпрямительного моста, о т л и ч а ю щ е е с я тем, что, с целью повышения точности, в него введены второй, третий и четвертый источники опорного напряжения, блок ограничения и интегратор, выход которого соединен с третьим входом сумматора и с информационным входом второго элемента ограничения, управляющий вход которого подключен к управляющему входу блока ограничения, первый и второй информационные входы которого соединены с выходами соответственно второго и третьего источников опорного напряжения, выход блока ограничения подключен к первому входу интегратора, второй вход которого соединен с выходом четвертого источника опорного напряжения.

SU (11) 1015399 A

Изобретение относится к аналоговой вычислительной технике и предназначено для моделирования механических систем с парами трения, коэффициенты трения которых зависят от величины скорости относительного скольжения и от продолжительности периодов относительных покоя и движений элементов этих пар с учетом одинаковых постоянных времени экспоненциальных процессов изменения коэффициентов статического трения в эти периоды.

Известно устройство для моделирования коэффициента трения, содержащее двухполупериодный выпрямитель с инвертором, три сумматора, операционный усилитель с ограничителем в цепи обратной связи, интегрирующую цепочку и блок деления, воспроизводящее основные из известных зависимостей коэффициентов трения от скорости относительного скольжения с учетом влияния времени продолжительностей периодов относительных покоя и движения элементов моделируемой пары трения [1].

Недостатком данного устройства является то, что применение нелинейного блока деления отрицательно влияет на точность моделирования пар трения.

Наиболее близким к предлагаемому по технической сущности является устройство, содержащее диодный выпрямительный мост, в одну диагональ которого включен инвертор, вход которого является входом устройства, а вершина другой диагонали диодного выпрямительного моста соединена с управляющими входами двух ограничителей, опорные входы которых подключены к соответствующим источникам опорного напряжения, а выходы ограничителей соединены с первым и вторым входами сумматора, выход которого является выходом устройства [2].

Недостатком известного устройства является невозможность воспроизводить как падающую, так и горбатую зависимость коэффициента трения от скорости с учетом влияния продолжительности периодов относительных покоя и движения элементов моделируемой пары трения.

Цель изобретения - повышение точности и расширение функциональных возможностей устройства за счет воспроизведения падающей и горбатой характеристик коэффициента трения движения от скорости с учетом экспоненциальной зависимости коэффициента статического трения от продолжительности периодов относительных покоя и движения элементов пары трения при одинаковых постоянных времени этих периодов.

Указанная цель достигается тем, что в устройство для моделирования

коэффициента трения, содержащее диодный выпрямительный мост, в диагональ которого включен инвертор, выводы диодного выпрямительного моста подключены к управляющим входам соответственно первого и второго элементов ограничения, информационный вход первого из которых соединен с выходом первого источника опорного напряжения, выходы первого и второго элементов ограничения подключены соответственно к первому и второму входам сумматора, выход которого является выходом устройства, вход которого соединен с соответствующим выводом диодного выпрямительного моста, введены дополнительный инвертор, второй, третий и четвертый источники опорного напряжения, блок ограничения и интегратор, выход которого подключен непосредственно к третьему входу сумматора, а через дополнительный инвертор - к информационному входу второго элемента ограничения, управляющий вход которого соединен с управляющим входом блока ограничения, первый и второй информационные входы которого подключены к выходам соответственно второго и третьего источников опорного напряжения, выход блока ограничения соединен с первым входом интегратора, второй вход которого подключен к выходу четвертого источника опорного напряжения.

По второму варианту в устройство для моделирования коэффициента трения, содержащее диодный выпрямительный мост, в диагональ которого включен инвертор, выводы диодного выпрямительного моста подключены к управляющим входам соответственно первого и второго элементов ограничения, информационный вход первого из которых соединен с выходом первого источника опорного напряжения, выходы первого и второго элементов ограничения подключены соответственно к первому и второму входам сумматора, выход которого является выходом устройства, вход которого соединен с соответствующим выводом диодного выпрямительного моста, введены второй, третий и четвертый источники опорного напряжения, блок ограничения и интегратор, выход которого соединен с третьим входом сумматора и с информационным входом второго элемента ограничения, управляющий вход которого подключен к управляющему входу блока ограничения, первый и второй информационные входы которого соединены с выходами соответственно второго и третьего источников опорного напряжения, выход блока ограничения подключен к первому входу интегратора, второй вход которого соединен с выходом четвертого источника опорного напряжения.

На фиг. 1 и 2 изображены варианты предлагаемого устройства.

Устройство содержит диодный выпрямительный мост 1 с инвертором 2, элементы 3 и 4 ограничения, сумматор 5, дополнительный инвертор 6, интегратор 7, блок 8 ограничения и источники 9-12 опорного напряжения. Кроме того, диодный выпрямительный мост 1 содержит диоды 13, инвертор 2 содержит операционный усилитель 14 и резисторы 15, элементы 3 и 4 ограничения содержат резисторы 16 и диоды 17, сумматор 5 содержит операционный усилитель 18 и резисторы 19. Инвертор 6 содержит операционный усилитель 20 и резисторы 21. Интегратор 7 содержит операционный усилитель 22, конденсатор 23 и резисторы 24. Блок 8 ограничения содержит диоды 25 и резисторы 26.

Устройство работает следующим образом.

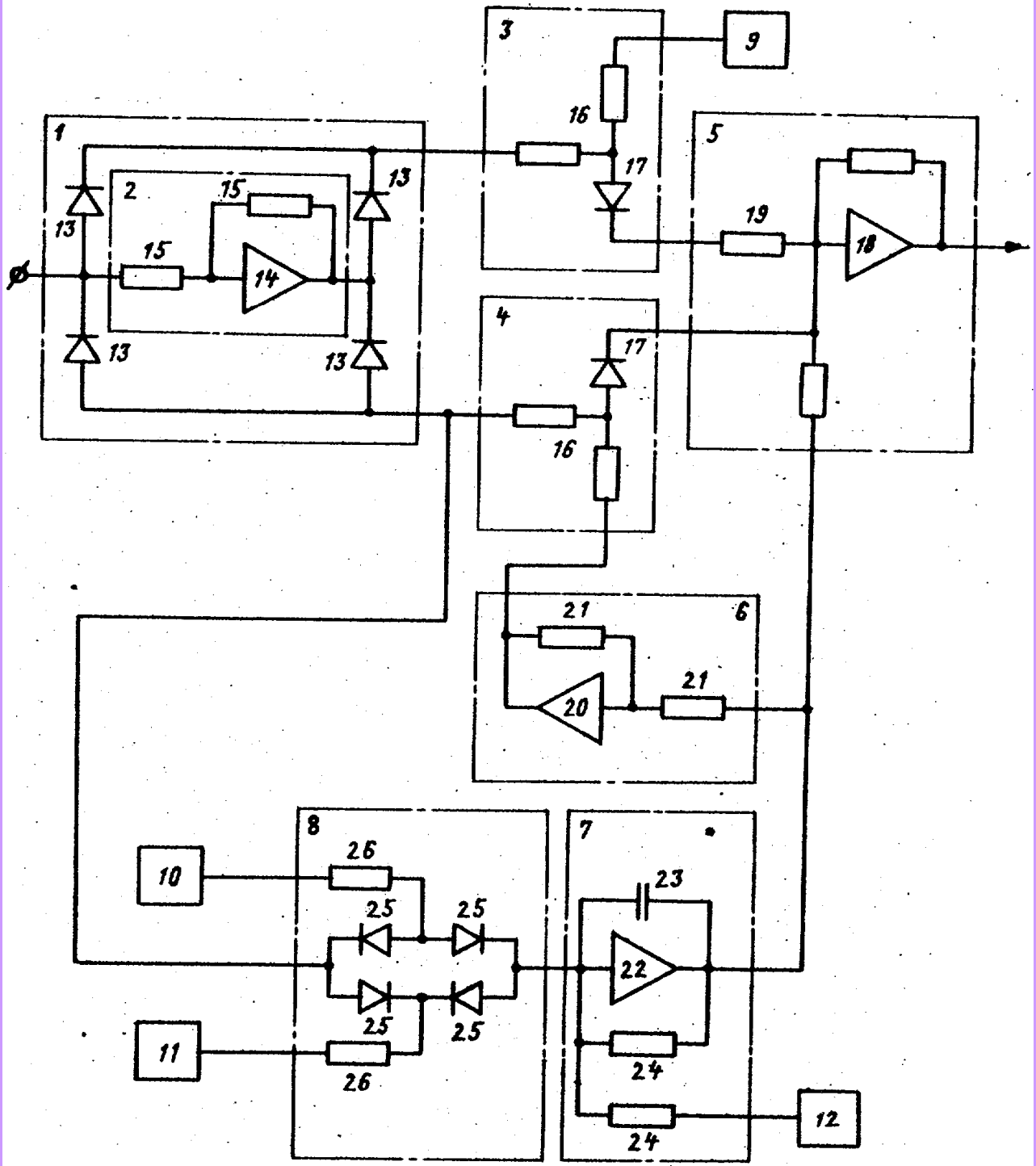
Напряжение с входа устройства, пропорциональное скорости относительного скольжения элементов моделируемой пары трения, после выпрямления на диодном мосте 1 в виде напряжения, пропорционального модулю скорости, одной полярности через первый ограничительный элемент 3, моделирующий зону нечувствительности с постоянным опорным напряжением от источника 9, пропорциональным скорости конца зоны граничного трения, подается на первый вход сумматора 5, а другой полярности через ограничительный элемент 4 с переменным опорным напряжением от дополнительного инвертора 6 подается на второй вход сумматора 5. Одновременно напряжение с одной из вершин выходной диагонали диодного выпрямительного моста 1 поступает на блок 8 ограничения и далее на интегратор 7 с постоянными опорными напряжениями от разнополярных источников 10 и 11 опорного напряжения, пропорциональными максимальному изменению коэффициента статического трения от времени в периоды относительных покоя или движения элементов пары трения. Напряжение с выхода ограничителя 8 через интегратор 7 подается непосредственно на третий вход сумматора 5 и через дополнительный инвертор

6 на опорный вход второго ограничительного элемента 4.

Последняя связь выхода интегратора 7 с опорным входом второго ограничительного элемента 4 обеспечивает определенную стабильность минимальных значений падающей зависимости коэффициента трения движения от скорости относительного скольжения в зоне граничного трения. Кроме того, на второй вход интегратора 7 подается постоянное напряжение от источника 12, пропорциональное экстремальному значению коэффициента статического трения. В результате алгебраического суммирования поступающих напряжений на выходе сумматора 5, т.е. на выходе устройства вырабатывается напряжение, пропорциональное коэффициенту трения или с падающей, или горбатой характеристикой зависимости от его величины скорости с учетом экспоненциальной зависимости коэффициента статического трения от продолжительности периодов относительных покоя и движения элементов пары трения при одинаковых постоянных времени этих периодов.

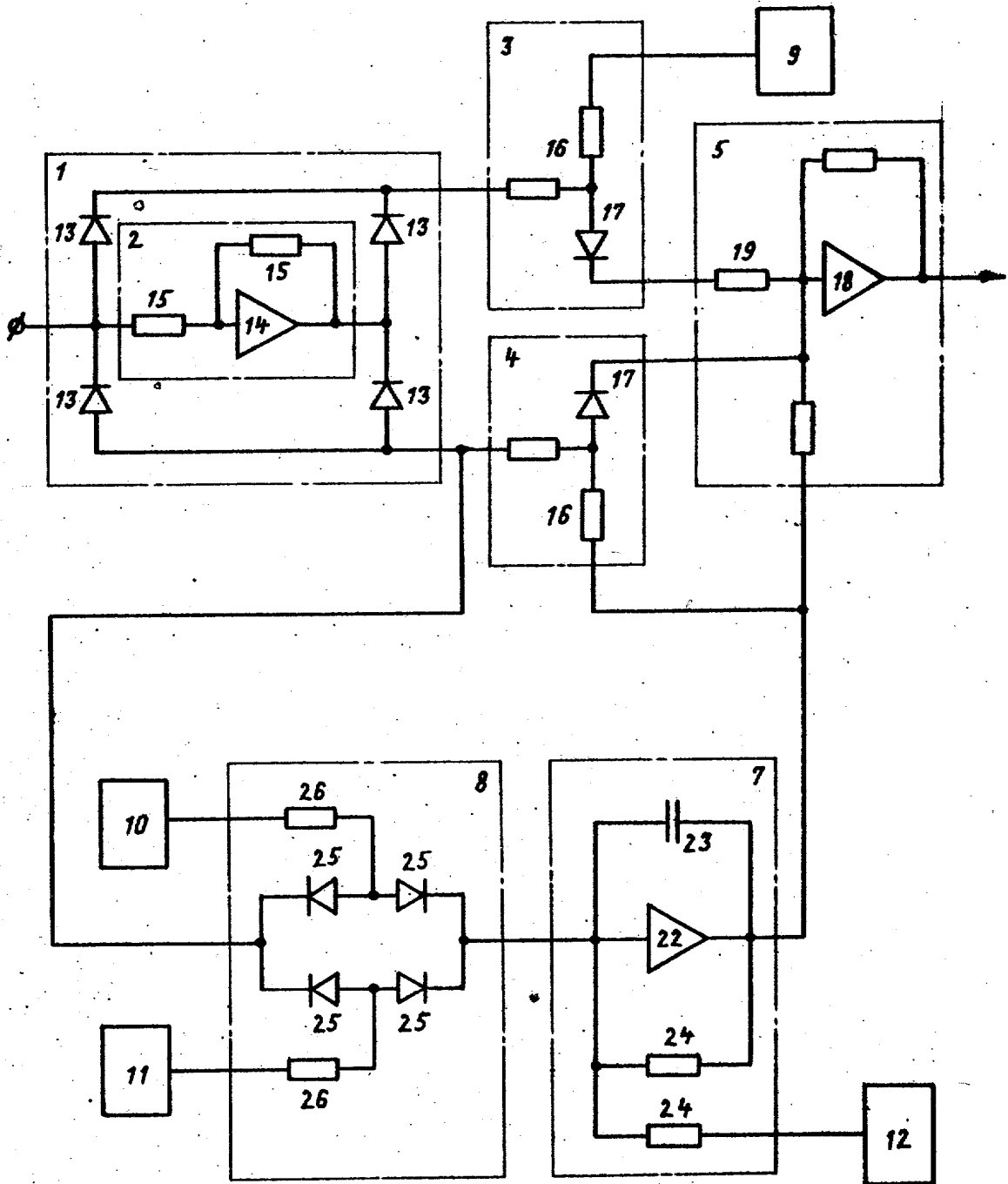
Переход от одного вида характеристики зависимости коэффициента трения движения от скорости к другой, например от падающей к горбатой, обеспечивается переключением управляющего входа ограничителя 8 интегратора 7 на другую вершину выходной диагонали диодного моста 1, исключением дополнительного инвертора 6 (во втором варианте) с непосредственным подключением выхода интегратора 7 к опорному входу второго ограничительного элемента 4 и изменением полярности напряжения источника 12. Воспроизведение отмеченных зависимостей коэффициента трения расширяет функциональные возможности устройства.

Предлагаемое устройство по сравнению с прототипом позволяет шире использовать аналоговые вычислительные машины для моделирования механических систем с парами трения. Наибольший эффект может быть получен при моделировании на наиболее простых и, следовательно, на наиболее дешевых аналоговых вычислительных машинах.



Фиг. 1





Фиг. 2

Редактор Ю.Ковач      Составитель В.Рыбин      Техред Т.Фанта      Корректор В.Гирняк

Заказ 3218/47      Тираж 706      Подписное  
 ВНИИПИ Государственного комитета СССР  
 по делам изобретений и открытий  
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

филиал ППП "Патент", г.Ужгород, ул.Проектная, 4

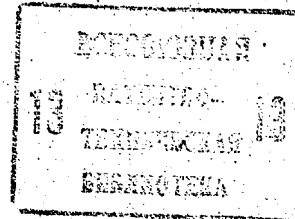




3(51) G06G 7/48

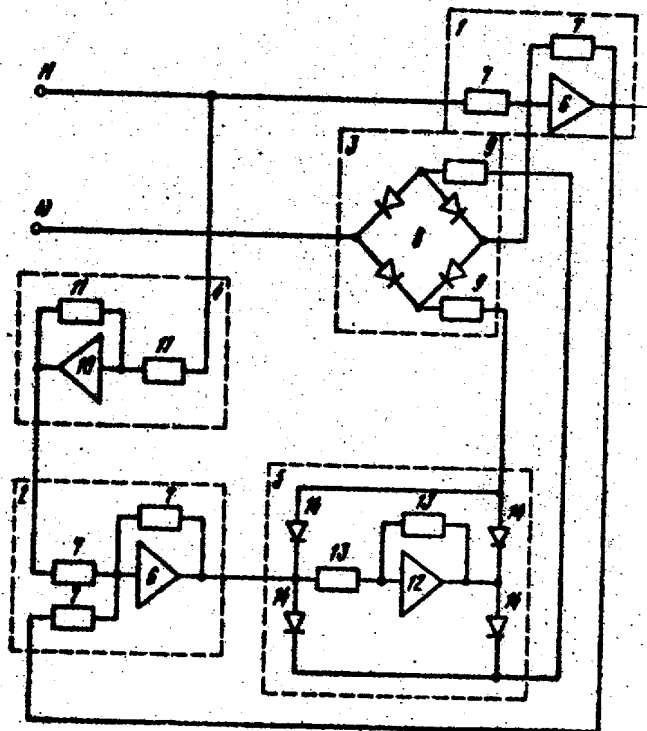
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ



- (21) 3314876/18-24
- (22) 13.07.81
- (46) 07.06.83, Бюл. 21
- (72) Г. В. Трель
- (71) Филиал Владимирского политехнического института в г. Коврове
- (53) 681.333 (088.8)
- (56) 1. Авторское свидетельство СССР № 222755, кл. G06G 7/48, 1967.
- 2. Авторское свидетельство СССР № 205384, кл. G06G 7/48, 1966 (прототип).
- (54) (57) УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КПД МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ, содержащее первый сумматор, блок ограничения, выход которого подключен к первому входу второго сумматора,

инвертор и двухполупериодный выпрямитель, отличающееся тем, что, с целью повышения точности, первый вход устройства соединен с входом инвертора и с вторым входом второго сумматора, выход которого является выходом устройства и подключен к первому входу первого сумматора, выход которого соединен с входом двухполупериодного выпрямителя, первый и второй выходы которого подключены соответственно к первому и второму управляющим входам блока ограничения, информационный вход которого является вторым входом устройства, выход инвертора соединен с вторым входом первого сумматора.



(19) **SU** (11) **1022184 A**

Изобретение относится к аналоговой вычислительной технике и предназначено для использования при моделировании систем с обратимыми и необратимыми механическими передачами и в системах автоматического управления с учетом КПД прямого и обратного ходов передач.

Известно устройство для моделирования КПД механических передач, содержащее два триггера Шмидта, логическую схему сравнения знаков напряжений, диодную схему, операционные усилители и блоки переменных коэффициентов, учитывающие КПД прямого и обратного ходов обратимых и необратимых передач [1].

Недостатком устройства является сложность из-за большого числа элементов и связей между ними, что отрицательно сказывается на точности его работы.

Наиболее близким по технической сущности к предлагаемому является устройство для моделирования КПД механических передач, содержащее два сумматора, инвертор, двухполупериодный выпрямитель с инвертором и релейный элемент с изменяемым опорным напряжением, также учитывающее КПД прямого и обратного ходов обратимых и необратимых механических передач [2].

Недостатком известного устройства является то, что применение большого числа операционных усилителей отрицательно сказывается на точности моделирования.

Цель изобретения - упрощение устройства и повышение точности моделирования.

Указанная цель достигается тем, что в устройстве для моделирования КПД механических передач, содержащем первый сумматор, блок ограничения, выход которого подключен к первому входу второго сумматора, инвертор и двухполупериодный выпрямитель, первый вход устройства соединен с входом инвертора и с вторым входом второго сумматора, выход которого является выходом устройства и подключен к первому входу первого сумматора, выход которого соединен с входом двухполупериодного выпрямителя, первый и второй выходы которого подключены соответственно к первому и второму управляющим входам блока ограничения, информационный вход которого является вторым входом устройства, выход инвертора соединен с вторым входом первого сумматора.

На чертеже представлена схема предлагаемого устройства.

Устройство содержит сумматоры 1 и 2, блок 3 ограничения, инвертор 4 и двухполупериодный выпрямитель 5. Кроме того, сумматоры 1 и 2 содержат операционные усилители 6 и масштабные резисторы 7. Блок 3 ограничения содержит ограничительные диоды 8 и масштабные резисторы 9. Инвертор 4 содержит операционный усилитель 10 и масштабные резисторы 11. Двухполупериодный выпрямитель содержит операционный усилитель 12, масштабные резисторы 13 и выпрямительные диоды 14.

Устройство работает следующим образом.

Устройство имеет два входа и один выход. Вход М подключен к выходу источника напряжения, пропорционального или моменту на выходном валу передачи, или приведенному (к выходному валу без учета потерь) моменту на входном валу. Вход Ш подключен к выходу источника напряжения, пропорционального частоте вращения валов передачи.

Напряжение с входа М, пропорциональное выходному (или приведенному) моменту передачи, через сумматор 1 поступает на вход сумматора 2. Соотношение величин масштабных резисторов 7 выбирается в соответствии с величинами коэффициентов потерь  $K_{Вых}$  (или  $K_{Вх}$ ) и  $K_{Вх}$  (или  $K_{Вых}$ ). В результате алгебраического суммирования указанных напряжений на выходе сумматора 2 вырабатывается напряжение, пропорциональное суммарному моменту переменных потерь передачи, поступающее на вход двухполупериодного выпрямителя 5. Напряжения с выходов двухполупериодного выпрямителя 5 в виде двух разнополярных напряжений, пропорциональных модулю суммарного момента переменных потерь, подаются в качестве опорных напряжений на управляющие входы блока 3 ограничения. В результате на точку суммирования сумматора 1 поступит то напряжение, которое по знаку будет соответствовать знаку напряжения на входе Ш, пропорционального частоте вращения валов и поступающего на информационный вход блока 3 ограничения. В результате этого на выходе сумматора 1, т.е. на выходе устройства, будет вырабатываться напряжение, пропорциональное приведенному входному (или выходному) моменту передачи.

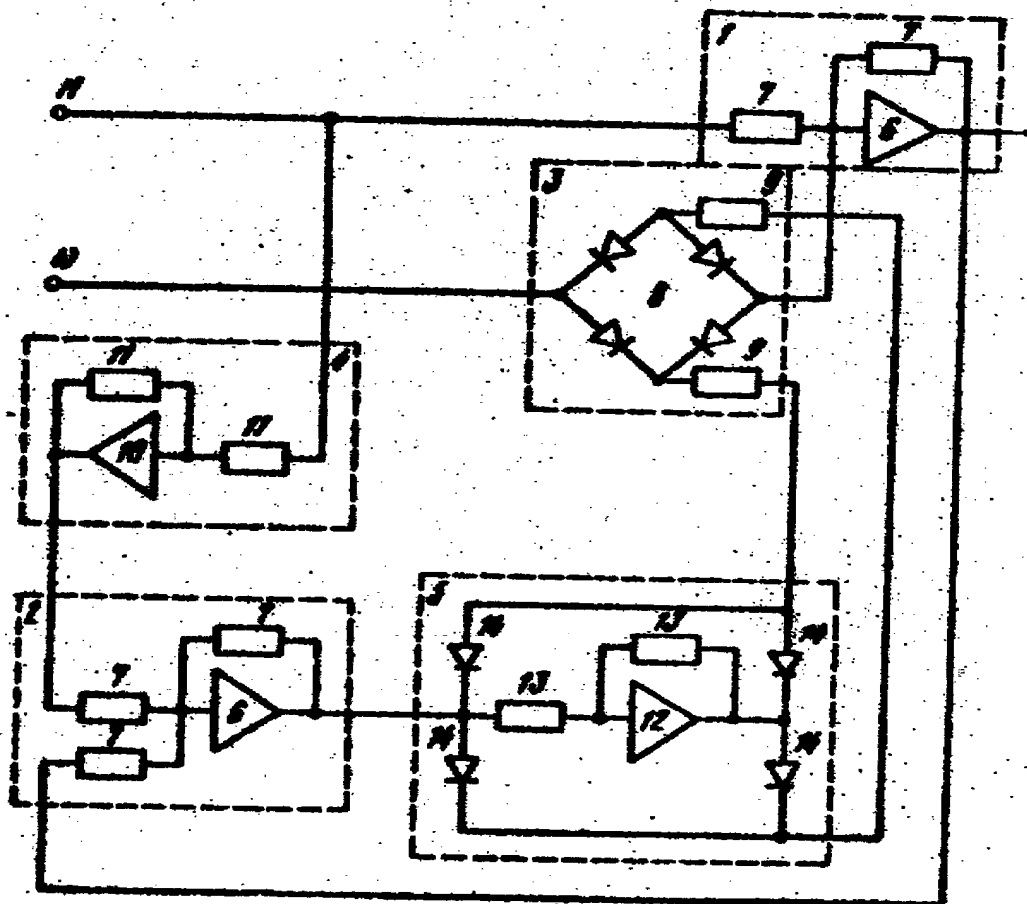
При моделировании передач с различными знаками коэффициентов потерь в отличие от схемы, представленной на чертеже, первый вход второго сумматора 2 непосредственно подключается к входу устройства по моменту.

Соотношение напряжений на входе и выходе устройства в зависимости от режима работы моделируемой передачи, т.е. от прямого или обратного хода ее, будет соответствовать величинам КПД прямого и обратного ходов как обратимых, так и необратимых механических передач:

$$\eta_{пх} = \frac{1 - K_{вх}}{1 + K_{вых}} \quad \text{и} \quad \eta_{ох} = \frac{1 - K_{вых}}{1 + K_{вх}}$$

где  $K_{вх}$ ,  $K_{вых}$  - коэффициенты потерь по приведенному входному и выходному моментам моделируемой передачи, которые для большинства передач имеют одинаковые знаки и только для некоторых, например из планетарных, они имеют различные знаки.

Предлагаемое выполнение устройства, сокращая число используемых операционных усилителей, позволяет моделировать системы с обратимыми и необратимыми механическими передачами на более простых и, следовательно, на более дешевых аналоговых вычислительных машинах.



Редактор А. Фролова      Составитель В. Рыбин      Корректор Ю. Макаренко  
 Техред М. Гергель  
 Заказ 4048/43      Тираж 706      Подписное  
 ВНИИПИ Государственного комитета СССР  
 по делам изобретений и открытий  
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5  
 Филiaal ППП "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4



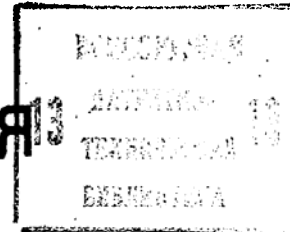
СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

(19) SU (11) 1043682 A

3(51) G 06 G 7/48

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

**ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**  
**К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ**



(21) 3441794/18-24  
(22) 20.05.82  
(46) 23.09.83. Бюл. № 35  
(72) Г. В. Трель и О. В. Косорукова  
(71) Филиал Владимирского политехнического института в г. Коврове  
(53) 681.333(088.8)

(56) 1. Авторское свидетельство СССР № 263294, кл. G 06 G 7/48, 1969.  
2. Авторское свидетельство СССР № 366478, кл. G 06 G 7/68, 1970 (прототип).

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ СИЛЫ ТРЕНИЯ ОТ СКОРОСТИ ПАР ТРЕНИЯ (ЕГО ВАРИАНТЫ).

(57) 1. Устройство для воспроизведения зависимости силы трения от скорости пар трения, содержащее интегратор, первый вход которого является входом устройства, о т л и ч а ю щ е е с я тем, что, с целью повышения точности, в него введены первый и второй блоки ограничения, причем выход первого блока ограничения, подключен ко второму входу интегратора, выход которого является выходом устройства и соединен с входом второго блока ограничения, выход которого подключен к входу первого блока ограничения и к третьему входу интегратора, выход которого подключен к четвертому входу интегратора.

(19) SU (11) 1043682 A

16.

2. Устройство для воспроизведения зависимости силы трения от скорости пар трения, содержащее интегратор, первый вход которого является входом устройства, о т л и ч а ю щ е е с я тем, что, с целью повышения точности, в него введены сумматор и первый и второй блоки ограничения, причем выход первого блока ограничения подключен к второму входу интегратора,

ра, выход которого является выходом устройства и соединен со входом второго блока ограничения, выход которого подключен к входу первого блока ограничения и к первому входу сумматора, выход которого соединен с третьим входом интегратора, выход которого подключен ко второму входу сумматора и к четвертому входу интегратора.

1

Изобретение относится к аналоговой вычислительной технике и предназначено для использования при моделировании механических систем с парами трения, силы трения которых зависят от направления и величины относительной скорости скольжения элементов пары трения.

Известно устройство для моделирования механических систем с трением, содержащее интегрирующий операционный усилитель, диоды и входные резисторы с четырехдиодным мостовым элементом, включенным между суммирующей точкой и выходом интегрирующего усилителя, воспроизводящее эффект действия на инерционную массу сил трения покоя и сил трения движения, при условии, что максимум силы трения покоя совпадает по величине с силой трения движения [1].

Недостатком этого устройства является то, что нелинейные характеристики используемых диодов воспроизводят только узкий класс нелинейных зависимостей, имеющих место при трении.

Наиболее близким по технической сущности к изобретению является устройство для моделирования механических систем с трением, содержащее интегрирующий операционный усилитель, диоды, входные резисторы с четырехдиодным мостовым элементом, включенным между суммирующей точкой и выходом интегрирующего усилителя, и промежуточный инерционный усилитель с ограничением, что дает возможность воспроизведения различий между трением покоя и трением движения [2].

2

Недостатком известного устройства являются его низкие точность и функциональные возможности при моделировании механических систем, имеющих сложные зависимости диссипативных сил от относительной скорости скольжения элементов пары трения.

Цель изобретения - повышение точности и расширение функциональных возможностей устройства.

Указанная цель достигается тем, что в устройство для воспроизведения зависимости силы трения от скорости пар трения, содержащее интегратор, первый вход которого является входом устройства, введены первый и второй блоки ограничения, причем выход первого блока ограничения подключен ко второму входу интегратора, выход которого является выходом устройства и соединен со входом второго блока ограничения, выход которого подключен ко входу первого блока ограничения и к третьему входу интегратора, выход которого подключен к четвертому входу интегратора.

Кроме того, в устройство для воспроизведения зависимости силы трения от скорости пар трения, содержащее интегратор, первый вход которого является входом устройства, введены сумматор и первый и второй блоки ограничения, причем выход первого блока ограничения подключен ко второму входу интегратора, выход которого является выходом устройства и соединен со входом второго блока ограничения, выход которого подключен ко входу первого блока ограничения и к первому входу сумматора, выход которого соединен с третьим вхо-

дом интегратора, выход которого подключен ко второму входу сумматора и к четвертому входу интегратора.

На фиг. 1 дано предлагаемое устройство по первому варианту исполнения; на фиг. 2 - то же, по второму варианту исполнения.

По первому варианту исполнения устройство содержит интегратор 1, блоки 2 и 3 ограничения. Интегратор 1 содержит операционный усилитель 4, масштабные резисторы 5 и накопительный конденсатор 6. Блоки 2 и 3 ограничения содержат операционные усилители 7, масштабные резисторы 8 и ограничительные стабилитроны 9.

Устройство по второму варианту исполнения содержит интегратор 1, блоки 2 и 3 ограничения, сумматор 4. Интегратор 1 содержит операционный усилитель 5, масштабные резисторы 6 и накопительный конденсатор 7. Блоки 2 и 3 ограничения содержат операционные усилители 8, масштабные резисторы 9 и ограничительные стабилитроны 10. Сумматор 4 содержит операционный усилитель 11 и масштабные резисторы 12.

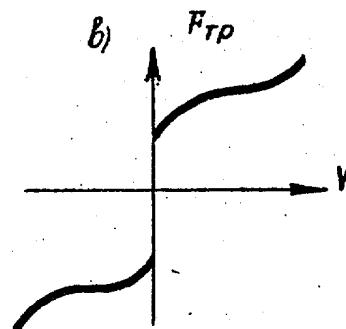
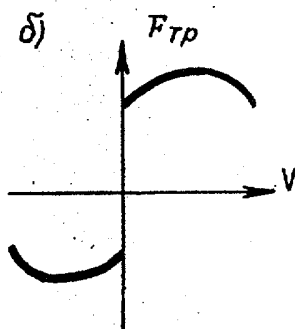
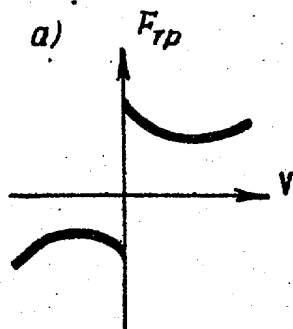
Устройство работает следующим образом.

При воспроизведении зависимости силы трения по первому варианту напряжение со входа устройства, пропорциональное активной силе  $P$ , действующей на моделируемую механическую систему, поступает на первый вход интегратора 1, выходной сигнал которого непосредственно поступает на четвертый вход интегратора 1, на третий его вход

через блок 3 ограничения с параллельными цепями ограничения; на второй вход интегратора 1 этот сигнал поступает через последовательно соединенные блок 3 ограничения и блок 2 ограничения. В результате алгебраического суммирования напряжений, поступивших на вход интегратора 1, и последующего интегрирования, на выходе интегратора, т.е. на выходе устройства, вырабатывается напряжение  $V$ , пропорциональное скорости с учетом "падающей" зависимости силы трения от относительной скорости скольжения элементов пары трения механической системы в режимах полусухого, граничного и полужидкостного трения.

В случае воспроизведения более сложных зависимостей силы трения от скорости (по второму варианту) выходной сигнал интегратора 1 поступает на третий его вход через блок 3 ограничения и сумматор 4, на второй вход которого поступает выходной сигнал интегратора 1.

В предлагаемом устройстве по сравнению с известным, в котором учитывается только линейная "падающая" зависимость силы трения от скорости, обеспечена возможность получения зависимости скорости системы от действующей на нее активной силы с учетом сложных нелинейных зависимостей силы трения  $F_{тр}$  от скорости  $V$ , а именно: "падающей" (а), "горбатой" (б) и "горбатой" с учетом жидкостного трения (в):



описываемых в общем случае следующим нелинейным уравнением:

$$F_{тр} = |F_n| \cdot \text{sign } V \pm \Delta F_{зр} \pm F_{ж},$$

где  $F_n$  - сила трения предельного состояния покоя перед началом движения;

$$\Delta F_{зр} = \begin{cases} K_{зр} V & \text{при } |V| \leq V_{зр \max} \\ \Delta F_{зр \max} \cdot \text{sign } V & \text{при } |V| > V_{зр \max} \end{cases}$$

55 ние силы трения в области граничного трения "—" для "падающей" и "+" для "горбчатых" зависимостей сила трения от скорости;

$K_{2p}$  - коэффициент пропорциональности линейного участка изменения силы трения в области граничного трения;

$\Delta F_{2p, max}$  - максимальное значение  $\Delta F_{2p}$ ;  
 $V_{2p, max}$  - скорость, соответствующая  $\Delta F_{2p, max}$ .

$$F_{ж} = \begin{cases} 0 & \text{при } |V| \leq V_{ж, min} \\ K_{ж} (|V| - V_{ж, min}) \text{ sign } V & \text{при } |V| > V_{ж, min} \end{cases}$$

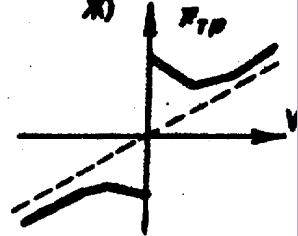
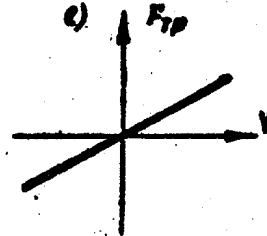
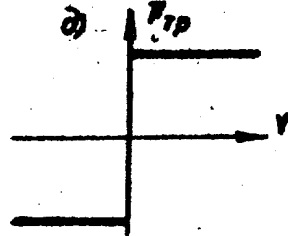
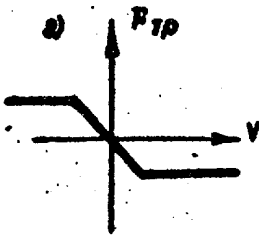
- сила жидкостного трения;

$V_{ж, min}$  - скорость, соответствующая началу характеристики жидкостного трения;

$K_{ж}$  - коэффициент жидкостного трения.

Введением блока 3 ограничения между выходом и суммирующей точкой интегратора 1 учитывается "падаю-

щий" характер зависимости силы трения от скорости до минимального значения силы трения в зоне до начала граничного трения (г). Введением блока 2 ограничения между выходом блока 3 ограничения и суммирующей точкой интегратора 1 учитывается экстремальное значение силы трения в зоне граничного трения (г). Введением непосредственной связи с выходом интегратора 1 на суммирующую его точку учитывается наличие в моделируемой механической системе жидкостного трения (е). Суммирующий же эффект от введения перечисленных элементов и связей позволяет учесть наличие в системе "падающих" зависимостей силы трения от скорости с учетом жидкостного трения (ж):

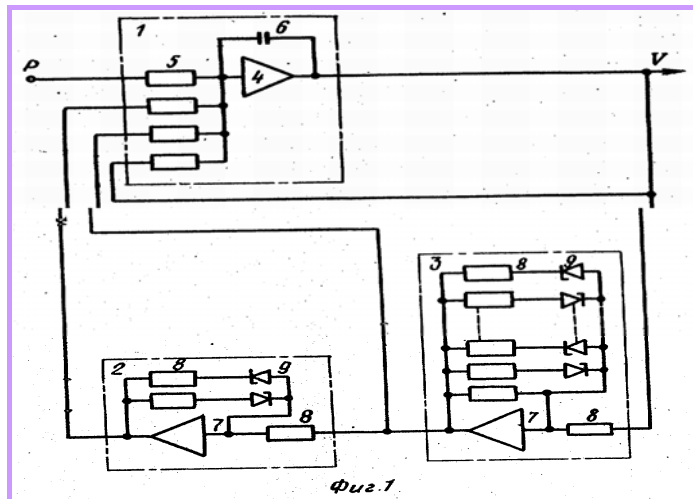


Инвертированием выходного сигнала блока 3 ограничения и введением связи с выхода интегратора на вход сумматора учитывается наличие в моделируемой механической системе "горбчатых" и "горбчатых" зависимостей силы трения от скорости с учетом жидкостного трения.

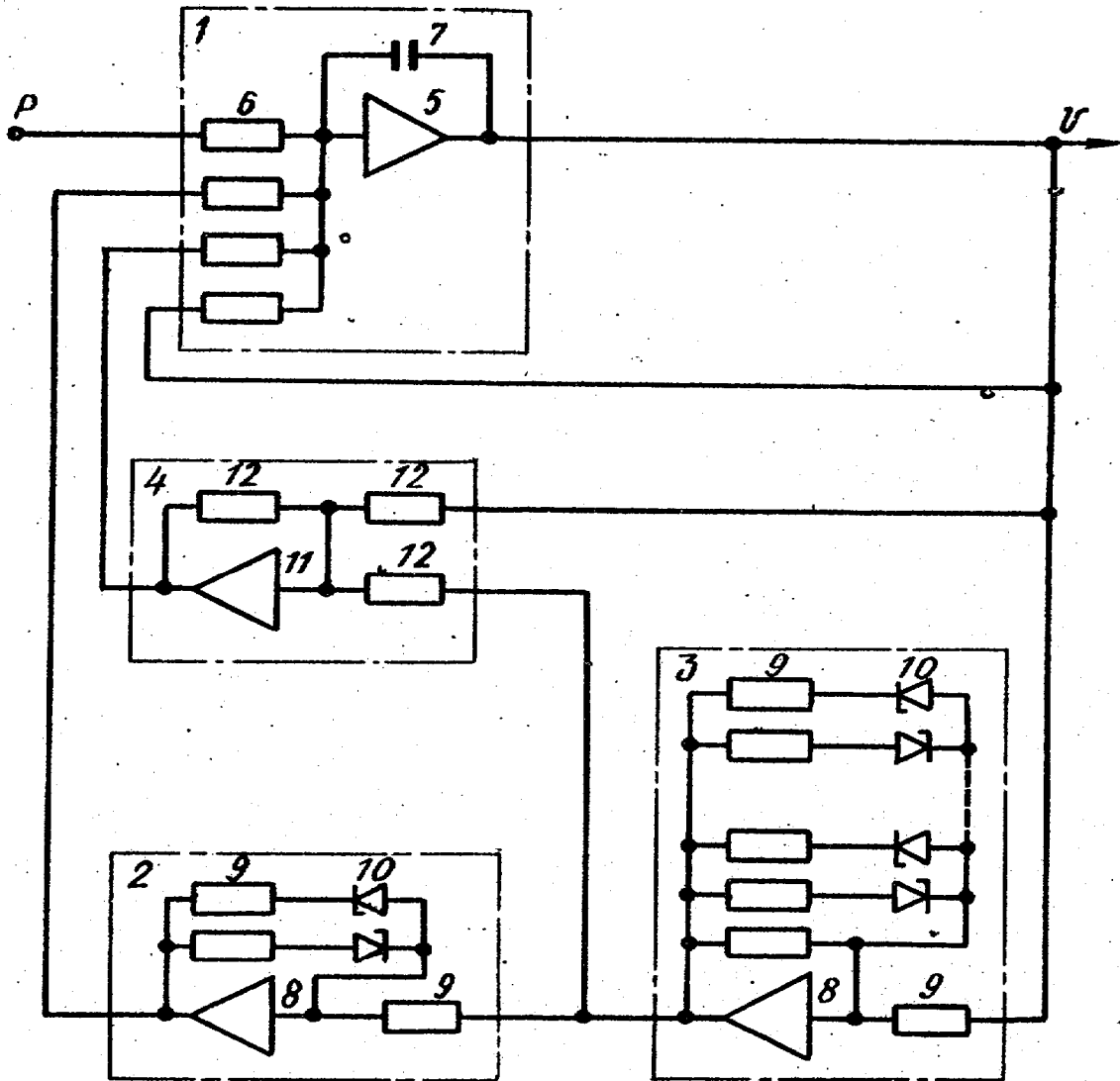
Точность аппроксимации характеристик может быть повышена увеличением числа параллельных цепей ограничения блоков 2 и 3 ограничения. Кроме того, настройкой резисторов можно отразить зависимости в режимах

сухого или жидкостного трения, а также при их совокупности, т.е. устройство отражает большинство известных зависимостей скорости механической системы от действующей на нее активной силы.

Технико-экономический эффект заключается в расширении функциональных возможностей устройства и в том, что оно позволяет моделировать механические системы с парами трения на наиболее простых и, следовательно, наиболее дешевых АВМ.



Фиг. 1



Фиг. 2

Составитель В. Рыбин  
 Редактор Н. Егорова Техред В. Далекорей Корректор А. Повх

Заказ 7340/53 Тираж 706 Подписное  
 ВНИИПИ Государственного комитета СССР  
 по делам изобретений и открытий  
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Филиал ППП "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4



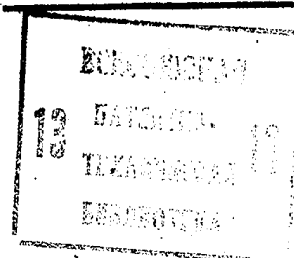


СОЮЗ СОВЕТСКИХ  
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ  
РЕСПУБЛИК

(19) **SU** (11) **1043683** **A**

3(51) G 06 G 7/48

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ



# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ И АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

- (21) 3459171/18-24  
 (22) 25.06.82  
 (46) 23.09.83. Бюл. № 35  
 (72) Г.В.Трель  
 (71) Ковровский филиал Владимирского политехнического института  
 (53) 681.333(088.8)  
 (56) 1. Авторское свидетельство СССР № 260292, кл. G 06 G 7/48, 1968.  
 2. Коган Б.Я. Электронные моделирующие устройства и их применение. М., Физматгиз, 1963, с.403 (прототип).  
 (54) (57) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДОВ ПОКОЯ И ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПАР ТРЕНИЯ, содержащее операционный усилитель, выход которого является выходом устройства и соединен с первым входом ограничителя максимального коэффициента трения покоя, выход которого соединен с входом операционного усилителя, выход которого соединен с первым входом ограничителя, выход которого соединен с входом операционного усилителя, вход которого является входом устройства, второй вход ограничителя максимального коэф-

фициента трения покоя подключен к первому выводу первого согласующего резистора, второй вывод которого соединен с выходом источника опорного напряжения, второй вход ограничителя подключен к первому выводу второго согласующего резистора, отличающееся тем, что, с целью повышения точности, в него введен блок формирования зависимости коэффициента трения от периода движения, содержащий два масштабных резистора; ограничительный диод и накопительный конденсатор, первый вывод которого соединен с первым выводом первого согласующего резистора, второй вывод накопительного конденсатора соединен с первым выводом первого масштабного резистора и с катодом ограничительного диода, анод которого подключен к первому выводу второго масштабного резистора, второй вывод которого соединен с вторым выводом первого масштабного резистора и с вторым выводом первого согласующего резистора, второй вывод второго согласующего резистора подключен к шине нулевого потенциала.

(19) **SU** (11) **1043683** **A**

Изобретение относится к аналоговой вычислительной технике и предназначено для использования при моделировании механических систем с парами трения, коэффициенты трения движения которых зависят от продолжительности периодов относительных покоя и движения элементов этих пар.

Известно устройство для моделирования коэффициента трения, содержащее инвертор, двухполупериодный диодный выпрямитель, три сумматора, блок деления, релейное звено на операционном усилителе с диодными ограничителями в его обратных связях, интегрирующую цепочку, выполненную на конденсаторе и двух резисторах, один из которых последовательно соединен с диодом, воспроизводящее зависимость коэффициента трения движения от относительной скорости элементов моделируемой пары трения с учетом влияния продолжительности периодов их относительных движения и покоя [1].

Недостатком этого устройства является большое число элементов и связей между ними, что снижает точность моделирования.

Наиболее близким по технической сущности к изобретению является устройство для моделирования силы сухого трения, содержащее операционный усилитель, вход и выход которого являются соответственно входом и выходом устройства, два диодных ограничителя, первые входы которых подключены к выходу операционного усилителя, а выходы - к его входу, ко вторым входам ограничителей через согласующие резисторы подключены источники постоянных опорных напряжений [2].

Недостатком известного устройства является то, что оно не воспроизводит зависимости коэффициента трения от продолжительности периодов относительных покоя и движения элементов этих пар.

Целью изобретения является повышение точности воспроизведения.

Для достижения поставленной цели в устройство, содержащее операционный усилитель, выход которого является выходом устройства и соединен с первым входом ограничителя максимального коэффициента трения покоя, выход которого соединен со входом операцион-

ного усилителя, выход которого соединен с первым входом ограничителя, выход которого соединен со входом операционного усилителя, вход которого является входом устройства, второй вход ограничителя максимального коэффициента трения покоя подключен к первому выводу первого согласующего резистора, второй вывод которого соединен с выходом источника опорного напряжения, второй вход ограничителя подключен к первому выводу второго согласующего резистора, введен блок формирования зависимости коэффициента трения от периода движения, содержащий два масштабных резистора, ограничительный диод и накопительный конденсатор, первый вывод которого соединен с первым выводом первого согласующего резистора, второй вывод накопительного конденсатора соединен с первым выводом первого масштабного резистора и с катодом ограничительного диода, анод которого подключен к первому выводу второго масштабного резистора, второй вывод которого соединен со вторым выводом первого масштабного резистора и со вторым выводом первого согласующего резистора, второй вывод второго согласующего резистора подключен к шине нулевого потенциала.

На чертеже изображено предлагаемое устройство.

Устройство содержит операционный усилитель 1, ограничитель 2 максимального коэффициента трения покоя, ограничитель 3, согласующие резисторы 4 и 5, источник 6 опорного напряжения, блок 7 формирования зависимости коэффициента трения от периода движения, который состоит из накопительного конденсатора 8, двух масштабных резисторов 9, 10 и ограничительного диода 11. Кроме того, ограничители 2 и 3 содержат диоды 12 и резисторы 13.

Устройство работает следующим образом.

Напряжение со входа устройства, пропорциональное модулю относительной скорости скольжения элементов моделируемой пары, подается на вход операционного усилителя 1, на выходе которого за счет его высокого коэффициента усиления напряжение практически скачком возрастает до такого значения, при котором потенциал на

втором входе ограничителя 2 уменьшится практически до нуля. При этом диод 12 ограничителя 2 откроется и введет в действие резисторную обратную связь; поэтому величина напряжения на выходе операционного усилителя 1 будет определяться потенциалом напряжения на делителе, состоящем из последовательно соединенных резистора 13 ограничителя 2 и первого согласующего резистора 4 с параллельным ему блоком 7 формирования зависимости коэффициента трения от периода движения. Этот потенциал зависит как от соотношений сопротивлений резисторов указанного делителя напряжения, так и от напряжений источника 6, пропорционального максимальному коэффициенту трения трогания.

В момент скачка выходного напряжения операционного усилителя 1, соответствующего моменту трогания, делитель напряжения будет представлять собой последовательную цепь из резистора 13, ограничителя 2 и параллельных первого согласующего резистора 4 с масштабными резисторами 9 и 10, а после зарядки накопительного конденсатора 8 - только из резистора 13, ограничителя 2 и первого согласующего резистора 4. В результате напряжение на выходе операционного усилителя 1, т.е. на выходе устройства, пропорциональное коэффициенту трения движения, экспоненциально от большей величины, соответствующей коэффициенту трения трогания, будет уменьшаться до величины, соответствующей текущему значению коэффициента трения движения, зависящему как от величины коэффициента трения трогания, так и от продолжительности периода движения.

При уменьшении напряжения на входе операционного усилителя 1 до нуля, что соответствует прекращению относительного движения элементов моделируемой пары трения, т.е. в момент окончания периода относительного движения и начала периода их относительного покоя, потенциал напряжения на втором входе ограничителя 2 начнет экспоненциально увеличиваться до величины, соответствующей текущему значению коэффициента трения трогания, зависящему как от величины коэффициента трения движения

в момент остановки, так и от продолжительности периода покоя.

Заземление второго входа ограничителя 3 через второй согласующий резистор 5 обеспечивает устойчивую работу операционного усилителя 1, в частности при нулевом напряжении на его входе.

Выбор направления установки диода 11 и соотношений величины емкости накопительного конденсатора 8 и сопротивлений резисторов 4, 9 и 10 обеспечиваются требуемые соотношение и величины (в общей случае) различных постоянных времени отмеченных экспоненциальных процессов изменения коэффициентов трения движения и трогания в периоды относительных движения и покоя.

Выполнение устройства предлагаемым образом позволяет на выходе операционного усилителя, т.е. на выходе устройства, воспроизвести напряжение, пропорциональное текущему значению коэффициента трения движения  $f_{i+1}^{AB}$ , описываемому следующим уравнением:

$$f_{i+1}^{AB} = f_i^{TP} \left( t_{i+1}^{AB} = 0 \right) - \left( 1 - e^{-\frac{t_{i+1}^{AB}}{T_{AB}}} \right) \times \left[ f_i^{TP} \left( t_{i+1}^{AB} = 0 \right) - f_{min}^{AB} \right],$$

где  $i$  - порядковый номер последовательно чередующихся периодов покоя и движения;  
 $t_{i+1}^{AB}$  - текущее время продолжительности  $i+1$  периода относительного движения, отсчитываемое с момента начала этого периода;

$$f_i^{TP} = f_{i-1}^{AB} \left( t_i^{пк} = 0 \right) + \left( 1 - e^{-\frac{t_i^{пк}}{T_{пк}}} \right) \times \left[ f_{max}^{TP} - f_{i-1}^{AB} \left( t_i^{пк} = 0 \right) \right],$$

где  $f_i^{TP}$  - текущее значение коэффициента трения трогания в  $i$  период покоя;  
 $t_i^{пк}$  - текущее время продолжительности  $i$  периода относительного покоя, отсчитываемое с момента начала этого периода;

$f_{i-1}^{AB}(t_i^{пк}=0)$  - коэффициент трения движения в момент окончания  $i-1$  периода движения и начала  $i$  периода покоя, т.е. в момент остановки при  $t_i^{пк} = 0$ ;

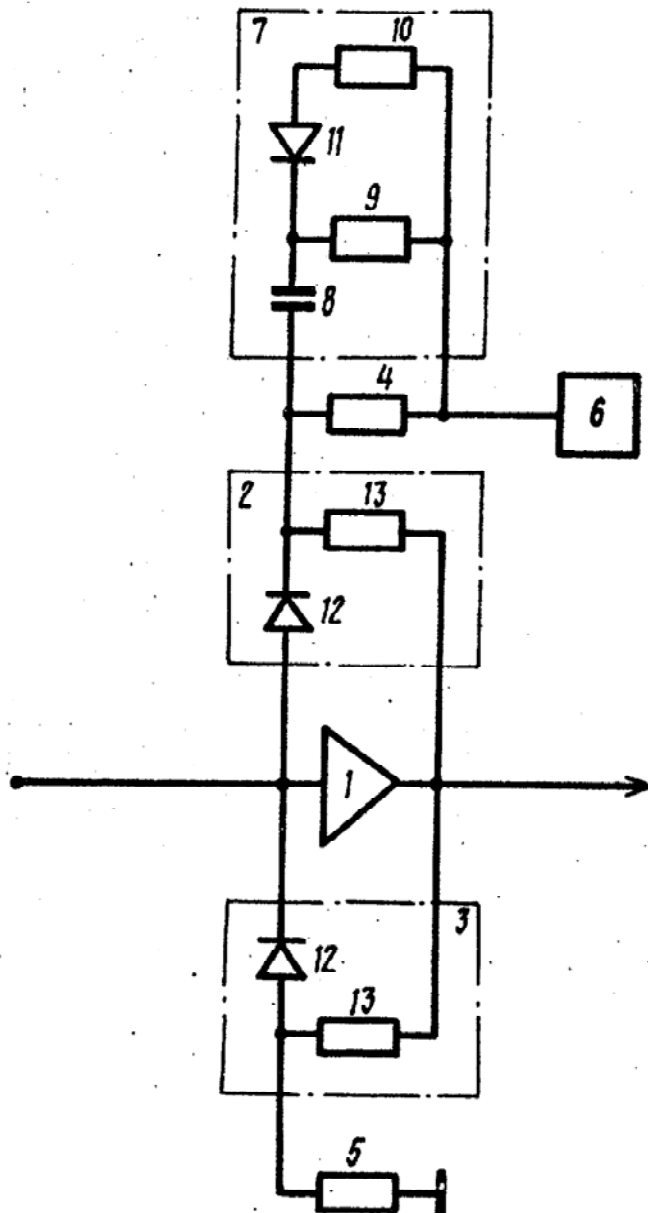
$f_i^{TR}(t_{i+1}^{AB}=0)$  - коэффициент трения трогания в момент окончания  $i$  периода покоя и начала  $i+1$  периода движения, т.е. при  $t_{i+1}^{AB} = 0$ ;

$f_{max}^{TR}, f_{min}^{AB}$  - максимальные и минимальные возможные значения коэффициентов трения соответственно трогания и движения

$T_{пк}, T_{AB}$  - постоянные времени экспоненциальных процессов изменения коэффициентов

трения трогания и движения в периоды относительных покоя и движения, в общем случае  $T_{пк} \neq T_{AB}$ .

5 Этим обеспечивается расширение функциональных возможностей предлагаемого устройства по сравнению с известным, что позволяет шире использовать аналоговые вычислительные машины для моделирования механических систем с парами трения, особенно в тех случаях, когда элементы этих пар работают в режиме чередования периодов относительных движения и покоя. Наибольший эффект может быть получен при моделировании на наиболее простых и, следовательно, на наиболее дешевых аналоговых вычислительных машинах.



ВНИИПИ Заказ 7340/53  
Тираж 706 Подписное

Филиал ППП "Патент",  
г. Ужгород, ул. Проектная, 4