

УДК 621.375.024; 681.326

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА КОНТРОЛЛЕРОВ СОГЛАСОВАНИЯ  
МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ  
СИСТЕМ С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ  
И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**

<sup>1</sup>Анкудинов К.А., <sup>2</sup>Анкудинов А.И., <sup>2</sup>Карпов Е.Б., <sup>2</sup>Карпов И.Е.

<sup>1</sup>Финансовый университет при Правительстве РФ, филиал, Тула,  
*e-mail: kaankudinov@mail.ru, aai\_tula@mail.ru;*

<sup>2</sup>Тульский институт экономики и информатики, Тула, *e-mail: aai\_tula@mail.ru*

Разработан алгоритм расчета контроллеров согласования микроконтроллерных измерительно-управляющих систем с измерительными преобразователями и исполнительными устройствами систем. Подынтервалы выходных напряжений измерительных преобразователей и входных напряжений исполнительных устройств могут быть любыми из интервала напряжений от -15 до +15 В, а входные и выходные напряжения микроконтроллерных измерительно-управляющих систем строго определены интервалом от 0 до +5 В, что и определяет необходимость разработки алгоритма расчета контроллеров согласования таких систем по входам и по выходам.

**Ключевые слова:** контроллер согласования, микроконтроллерная измерительно-управляющая система

**ALGORITHM FOR CALCULATING THE MATCHING CONTROLLERS  
OF MICROCONTROLLER MEASURING CONTROLLING SYSTEMS WITH  
MEASURING TRANSDUCERS AND ACTUATION DEVICES**

<sup>1</sup>Ankudinov K.A., <sup>2</sup>Ankudinov A.I., <sup>2</sup>Karpov E.B., <sup>2</sup>Karpov I.E.

<sup>1</sup>Financial University under the Government of the Russian Federation, Tula branch, Tula, *e-mail: kaankudinov@mail.ru, aai\_tula@mail.ru;*

<sup>2</sup>Tula institute of economy and informatics, Tula, *e-mail: aai\_tula@mail.ru*

The algorithm for calculating the matching controllers of microcontroller measuring controlling systems with measuring transducers and actuation devices of systems is developed. Subintervals of output voltages of measuring transducers and input voltages of actuation devices can be any in the voltage interval from -15 to +15 V, and input/output voltages of microcontroller measuring controlling systems are strictly limited by the interval from 0 to +5 V, as determines need for development an algorithm of calculation the matching controllers of such systems by inputs and outputs.

**Keywords:** the matching controller, microcontroller measuring controlling system

Обобщенная блок-схема микроконтроллерной (МК) измерительно-управляющей системы (ИУС) представлена на рис. 1 и включает в себя: собственно МК ИУС [1, 2, 5, 6, 14]; совокупность различных измерительных преобразователей

(ИП); совокупность контроллеров согласования по входу ( $KC_{BX}$ ) МК ИУС; совокупность контроллеров согласования по выходу ( $KC_{ВЫХ}$ ) МК ИУС; совокупность различных исполнительных устройств (ИУ).



Рис. 1. Обобщенная блок-схема МК ИУС

В качестве совокупности ИП используются [4, 7, 12, 16]: датчики температуры, датчики активного и реактивного сопротивлений, измерительные шунты, тензومترические датчики, датчики электрохимического потенциала (ДЭХП) [4], датчики

поляризационного потенциала (ДПП) [4] и др., а в качестве ИУ [3, 8, 10, 11, 13, 15, 17] – различные типы электродвигателей, тахогенераторы (ТГ) [8, 17], электронных усилителей, тиристорные и оптоэлектронные твердотельные переключатели и регу-

ляторы (ОТПР) [10], генераторы, модуляторы и др. В современных МК ИУС, с точки зрения критерия функциональная полнота / стоимость, целесообразно использовать МК фирм «Atmel» и «Microchip» [1, 2, 5], тогда интервалы входных и выходных напряжений МК ИУС строго определены:  $u_{\text{вх МК ИУС}} \in [0; +5] \text{ В}$ ;  $u_{\text{вых МК ИУС}} \in [0; +5] \text{ В}$ . Учитывая функциональные связи, из рис. 1 следует:  $u_{\text{вых КСВХ}} = u_{\text{вх МК ИУС}} \in [0; +5] \text{ В}$ ;  $u_{\text{вх КСВЫХ}} = u_{\text{вых МК ИУС}} \in [0; +5] \text{ В}$ . Выходные напряжения ИП являются входными напряжениями КСВХ и могут быть любыми подынтервалами из интервала напряжений  $u_{\text{вх КСВХ}} = u_{\text{вых ИП}} \in [-15; +15] \text{ В}$ , а выходные напряжения КСВЫХ являются входными напряжениями ИУ и тоже могут быть любыми подынтервалами из интервала напряжений  $u_{\text{вых КСВЫХ}} = u_{\text{вх ИУ}} \in [-15; +15] \text{ В}$ .

**Цель работы.** Разработать алгоритм расчета КС<sub>ВХ</sub> – для сопряжения ИП с МК ИУС и КС<sub>ВЫХ</sub> – для сопряжения МК ИУС с ИУ, удовлетворяющих условиям:

$$\begin{cases} u_{\text{вх КС ВХ}} \in [-15; +15] \text{ В}; \\ u_{\text{вых КС ВХ}} \in [0; +5] \text{ В}; \\ u_{\text{вх КС ВЫХ}} \in [0; +5] \text{ В}; \\ u_{\text{вых КС ВЫХ}} \in [-15; +15] \text{ В}, \end{cases} \quad (1)$$

которые позволяют выбрать элементную базу для построения схемы таких контроллеров согласования: КС<sub>ВХ</sub> – первая система уравнений в (1); КС<sub>ВЫХ</sub> – вторая система уравнений в (1).

**Электрическая схема КС<sub>ВХ</sub> и КС<sub>ВЫХ</sub>.** Существует большое множество вариантов подынтервалов входных сигналов КС<sub>ВХ</sub> и выходных сигналов КС<sub>ВЫХ</sub>, которое определяется большим разнообразием типом ИП и ИУ, соответственно. Принимая во внимание условия (1), синтезировать КС<sub>ВХ</sub> и КС<sub>ВЫХ</sub> целесообразно на основе операционных усилителей (ОУ) [3, 7, 9-11, 16]. Схема КС<sub>ВХ</sub> и КС<sub>ВЫХ</sub> одна и та же, а разница лишь в их настройке на соответствие условиям (1) и в месте установки в МК ИУС (рис. 1). Поэтому, где это допустимо, контроллеры сопряжения по входу и выходу КС<sub>ВХ</sub> и КС<sub>ВЫХ</sub> будем называть просто КС. Принципиальная электрическая схема КС на двух ОУ – КР140УД708 представлена на рис. 2.

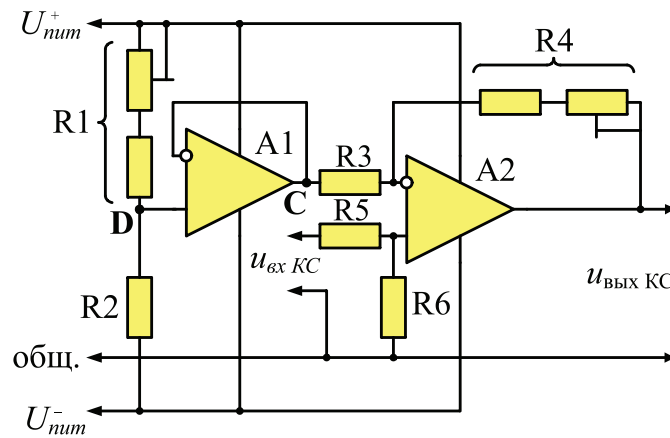


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема КС на двух ОУ – КР140УД708

Первый ОУ А1 – неинвертирующий повторитель напряжения (инверсный вход А1 соединен с выходом) [7, 16] с коэффициентом передачи  $K_{A1} = 1$ . Вторым ОУ А2 – неинвертирующий каскад [9-11] с коэффициентом передачи  $K_{A2} \neq 1$ . На прямой вход А1 подается напряжение  $U_D$  (точка D на рис. 2) с делителя R1R2. Так как  $K_{A1} = 1$ , то потенциалы точек D и C (рис. 2) равны между собой  $U_D = U_C$ , а напряжение  $U_C$  – начальное смещение А2 по инверсному входу.

**Графо-аналитическая интерпретация работы КС.** Из выражения (1) следует, что КС<sub>ВХ</sub> имеет большое множество подынтервалов входных сигналов, а КС<sub>ВЫХ</sub> – большое множество подынтервалов выходных сигналов. Чтобы получить и обобщить результаты исследования рассмотрим графо-аналитическую интерпретацию работы КС на примере двух подынтервалов входных сигналов КС<sub>ВХ</sub> и двух подынтервалов выходных сигналов КС<sub>ВЫХ</sub>. На двух следующих по тексту рисунках в одном масштабе показаны

по две вертикальные оси (левая – ось входных сигналов КС –  $u_{вхКС}$ , правая – ось выходных сигналов КС –  $u_{выхКС}$ , соответственно) и безразмерная горизонтальная линия, соединяющая нулевые значения входного и выходного сигнала КС  $u_{вхКС} = u_{выхКС} = 0$  В.

На рис. 3 представлена графо-аналитическая интерпретация процесса работы двух КС<sub>ВХ</sub> при  $u_{вых КС ВХ} = u_{вх МК ИУС} \in [0; +5]$  В.  
 На рис. 4 изображена графо-аналитическая интерпретация процесса работы двух КС<sub>ВЫХ</sub> при  $u_{вх КС} = u_{вых МК ИУС} \in [0; +5]$  В.

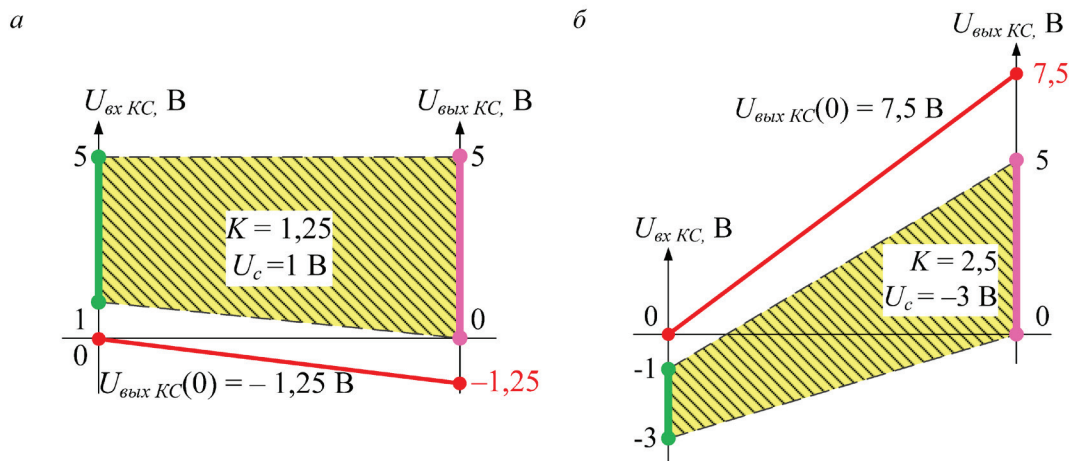


Рис. 3. Графо-аналитическая интерпретация работы двух КС<sub>ВХ</sub>:  
 а – ИП – ДПП [4] с  $u_{вх КС} = u_{вых ИП} \in [+1; +5]$  В; б – ИП – ДЭХП [4] с  $u_{вх КС} = u_{вых ИП} \in [-3; -1]$  В

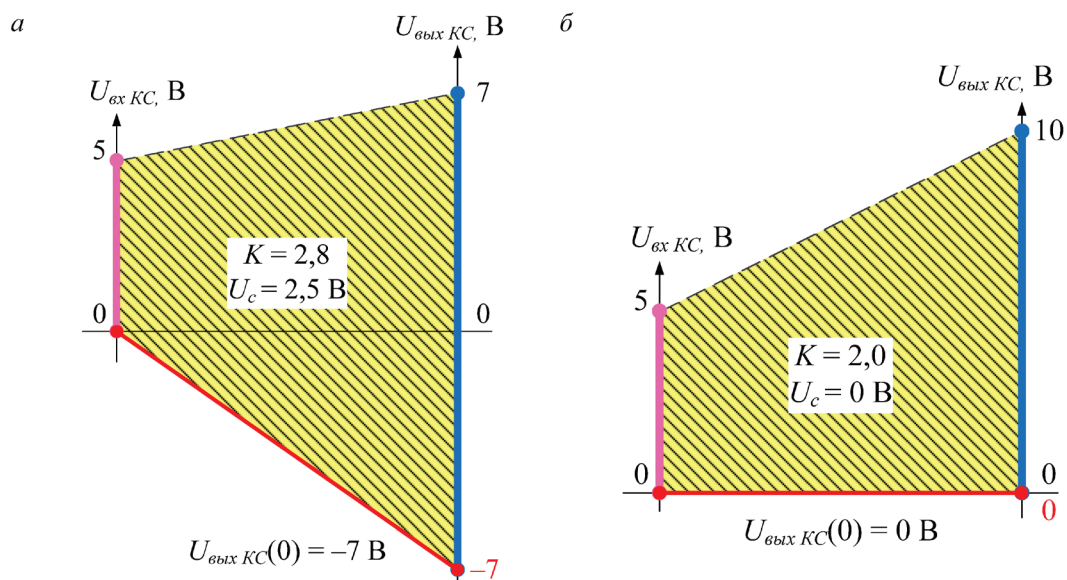


Рис. 4. Графо-аналитическая интерпретация работы двух КС<sub>ВЫХ</sub>:  
 а – ИУ – ТГ [8, 17] с  $u_{вых КС} = u_{вх ИУ} \in [-7; +7]$  В; б – ИУ – ОТПР [10] с  $u_{вых КС} = u_{вх ИУ} \in [0; +10]$  В

Так как коэффициент передачи каскада А1  $K_{A1} = 1$  (рис. 2), то коэффициент пере-

дачи КС (каскада А2 КС) определяется из выражения (рис. 3, рис. 4)

$$K = K_{A2} = \frac{U_{\text{вых КС max}} - U_{\text{вых КС min}}}{U_{\text{вх КС max}} - U_{\text{вх КС min}}} = \frac{\Delta U_{\text{вых КС}}}{\Delta U_{\text{вх КС}}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{вых КС max}}$  и  $U_{\text{вых КС min}}$  – максимальное и минимальное напряжение выходных сигналов КС ( $K_{C_{\text{вх}}}$  или  $K_{C_{\text{вых}}}$ );  $\Delta U_{\text{вых КС}}$  – модуль интервала выходных напряжений КС;  $U_{\text{вх КС max}}$  и  $U_{\text{вх КС min}}$  – максимальное и минимальное напряжение входных сигналов КС ( $K_{C_{\text{вх}}}$  или  $K_{C_{\text{вых}}}$ );  $\Delta U_{\text{вх КС}}$  – модуль интервала входных напряжений КС.

$U_{\text{вх КС max}}$ , коэффициенту передачи (2) –  $K$  и начальному смещению (4) –  $U_c$  представляется возможным провести проверку результатов расчета КС из системы уравнений:

$$\begin{cases} U_{\text{вых КС min}} = K (U_{\text{вх КС min}} - U_c); \\ U_{\text{вых КС max}} = K (U_{\text{вх КС max}} - U_c). \end{cases} \quad (7)$$

Из анализа процессов, представленных на рис. 3 и рис. 4, следует основное уравнение графо-аналитической интерпретации работы КС, определяющее численные значения напряжения на выходе КС  $U_{\text{вых КС}}(0)$  при котором напряжение на входе КС  $U_{\text{вх КС}} = 0 \text{ В}$

### Алгоритм расчета КС МК ИУС с ИП и ИУ

$$U_{\text{вых КС}}(0) = U_{\text{вых КС max}} - K \times U_{\text{вх КС max}}. \quad (3)$$

1. Для рассчитываемого КС, представленного на рис. 2, по заданным в (1) интервалам входных и выходных напряжений КС из (2) определяется коэффициент передачи КС –  $K$ .

Зная численные значения  $U_{\text{вых КС}}(0)$  и  $K$ , определяемые из (3) и (2), соответственно, и учитывая графо-аналитические интерпретации работы КС ( $K_{C_{\text{вх}}}$  и  $K_{C_{\text{вых}}}$ ) (рис. 3 и рис. 4) определяется начальное смещение ОУ А2 –  $U_c$  (рис. 2) по инверсному входу

2. Из основного уравнения (3) рассчитывается напряжение на выходе КС  $U_{\text{вых КС}}(0)$ , при котором напряжение на входе КС  $U_{\text{вх КС}} = 0 \text{ В}$ .

$$U_c = -\frac{U_{\text{вых КС}}(0)}{K}. \quad (4)$$

3. По формуле (4) рассчитывается начальное смещение ОУ А2 –  $U_c$ .

**Расчет элементов схемы КС.** В каскаде А2 КС (рис. 2) сопротивления резисторов R3 и R5 одного номинала и составляют единицы-десятки килоом [9, 11], а сопротивления резисторов R4 и R6 рассчитываются из обеспечения требуемого коэффициента передачи  $K$  (2)

4. Выбрав величину сопротивлений резисторов R3 = R5 (единицы-десятки килоом) [9, 11], по выражению (5) рассчитывается точное значение сопротивления резистора цепи обратной связи ОУ А2 R4 и выбираем значение сопротивления резистора R6  $\approx R4$ .

$$R6 \approx R4 = K \cdot R3. \quad (5)$$

В каскаде А1 КС (рис. 2) номиналы сопротивления резисторов R1 и R2 обычно различные, но в сумме составляют единицы-десятки килоом [7, 16]. Задавая сопротивлением резистора R2, из известного (4) начального смещения  $U_D = U_c$  по инверсному входу ОУ А1 определяется методом узловых потенциалов сопротивление резистора R1

5. Выбрав величину сопротивления резистора R2 (единицы-десятки килоом) [7, 16], по формуле (6) рассчитывается сопротивление резистора R1 делителя напряжения R1 R2.

$$R1 = \frac{U_{\text{num}}^+ - U_c}{U_c - U_{\text{num}}^-} R2, \quad (6)$$

6. По результатам расчета КС проводится аналитическая проверка алгоритма работы рассчитанного КС по системе уравнений (7).

где  $U_{\text{num}}^+ = +15 \text{ В}$  и  $U_{\text{num}}^- = -15 \text{ В}$  – напряжения питания двух ОУ А1 и А2 КС (рис. 2).

Проведем проверку работоспособности алгоритма расчета КС<sub>вх</sub> – сопряжение ИУ с МК ИУС на конкретном примере, представленном на рис. 3,а.

По известным численным значениям напряжений  $U_{\text{вых КС min}}$ ,  $U_{\text{вых КС max}}$ ,  $U_{\text{вх КС min}}$ ,

**Пример 1.** По предложенному алгоритму рассчитать и провести проверку результатов расчета КС<sub>вх</sub> с подынтервалом входных напряжений  $u_{\text{вх КС}} \in [+1; +5] \text{ В}$  и стандартным интервалом выходных напряжений  $u_{\text{вых КС}} \in [0; +5] \text{ В}$  (рис. 3,а).

1. По формуле (2) определяем  $K = (5-0)/(5-1) = 1,25$ .

2. Из уравнения (3) находим  $U_{\text{вых КС}}(0) = 5 - 1,25 \cdot 5 = -1,25 \text{ В}$ .

3. По формуле (4) вычисляем  $U_c = (-1,25/1,25) = +1 \text{ В}$ .

4. Выбираем R3 = R5 = 20 кОм, тогда из выражения (5) определяем величину сопро-

тивления резистора  $R4 = 1,25 \cdot 20 = 25$  кОм и принимаем  $R6 = 24$  кОм.

5. Выбираем  $R2 = 10$  кОм, тогда по формуле (6) находим величину сопротивления резистора  $R1 = [(15-1)/(1-(-15))] \cdot 10 = 8,75$  кОм.

6. Из системы уравнений (7) получаем:  $U_{\text{выхКСмин}} = 1,25(1-1) = 0$  В, и  $U_{\text{выхКСmax}} = 1,25(5-1) = 5$  В, что полностью соответствует исходным данным на расчет  $КС_{\text{ВХ}}$  (рис. 3,а). Решение задачи расчета  $КС_{\text{ВХ}}$  (рис. 3,б) тоже полностью подтверждает сходимость результатов проверки работоспособности предложенного алгоритма.

**Пример 2.** По предложенному алгоритму рассчитать и провести проверку результатов расчета  $КС_{\text{ВЫХ}}$  с подынтервалом выходных напряжений  $u_{\text{выхКС}} \in [-7; +7]$  В и стандартным интервалом входных напряжений  $u_{\text{вхКС}} \in [0; +5]$  В (рис. 4,а).

1. По формуле (2) определяем  $K = [7-(-7)]/(5-0) = 2,8$ .

2. Из уравнения (3) находим  $U_{\text{выхКС}}(0) = 7-2,8 \cdot 5 = -7$  В.

3. По формуле (4) вычисляем  $U_c = -(-7/2,8) = +2,5$  В.

4. Выбираем  $R3 = R5 = 20$  кОм, тогда из выражения (5) определяем величину сопротивления резистора  $R4 = 2,8 \cdot 20 = 56$  кОм и принимаем  $R6 = 56$  кОм.

5. Выбираем  $R2 = 10$  кОм, тогда по формуле (6) находим величину сопротивления резистора  $R1 = [(15-2,5)/(2,5-(-15))] 10 \approx 7,143$  кОм.

6. Из системы уравнений (7) получаем:  $U_{\text{выхКСмин}} = 2,8(0-2,5) = -7$  В, и  $U_{\text{выхКСmax}} = 2,8(5-2,5) = +7$  В, что полностью соответствует исходным данным на расчет  $КС_{\text{ВЫХ}}$  (рис. 4,а). Решение задачи расчета  $КС_{\text{ВЫХ}}$  (рис. 4,б) так же полностью подтверждает сходимость результатов проверки работоспособности предложенного алгоритма.

### Выводы

1. На основе анализа структуры МК ИУС (рис. 1) сделан вывод о целесообразности синтеза резистивных рассматриваемых  $КС_{\text{ВХ}}$  и  $КС_{\text{ВЫХ}}$  на основе ОУ (рис. 2).

2. На основе анализа графо-аналитической интерпретации работы двух  $КС_{\text{ВХ}}$  (рис. 3,а и 3,б) и двух  $КС_{\text{ВЫХ}}$  (рис. 4,а и 4,б) получено основное уравнение работы КС (3) –  $U_{\text{выхКС}}(0)$ , которое обеспечило возможность расчета начального смещения ОУ КС (4) –  $U_c$  для любых  $КС_{\text{ВХ}}$  и  $КС_{\text{ВЫХ}}$  по заданным исходным данным (1) и легло в основу разработанного алгоритма расчета КС МК ИУС с ИП и ИУ.

3. В лаборатории информационного технологий Тульского института экономики и информатики проведены проверки сходимости результатов алгоритма расчета и исследования принципиальных электрических схем, рассчитываемых вариантов КС,

которые свидетельствуют о высокой эффективности и работоспособности предложенного алгоритма и схемы КС.

### Список литературы

1. Агафонов Ю.М. Методика построения микроконтроллерных устройств управления СКЗ МГ / Ю.М. Агафонов, А.И. Анкудинов, С.И. Петрович, А.Б. Воскресенский, В.А. Михаленко, П.П. Какалин, Н.С. Акиншин, К.А. Анкудинов // Газовая промышленность. 2007. № 4. С. 48-51.

2. Агафонов Ю.М. Применение микроконтроллеров для синтеза цифровых конечных автоматов / Ю.М. Агафонов, Н.С. Акиншин, Р.Н. Акиншин, К.А. Анкудинов, А.И. Анкудинов, К.Ю. Казаков // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2007. № 5. С. 40-44.

3. Агафонов Ю.М. Расчет преобразователя «напряжение-напряжение» на операционных усилителях в измерительных комплексах телемеханики / Ю.М. Агафонов, Н.С. Акиншин, Р.Н. Акиншин, К.А. Анкудинов, А.И. Анкудинов // Датчики и системы. 2007. № 9. С. 14-16.

4. Агафонов Ю.М. Система контроля управления и согласования СКЗ с комплексами телемеханики / Ю.М. Агафонов, Н.С. Акиншин, К.А. Анкудинов, А.И. Анкудинов, А.Б. Воскресенский, Р.Н. Акиншин // Газовая промышленность. 2007. № 7. С. 58-61.

5. Акиншин Н.С. Синтез микроконтроллерных систем для исследования зрительно-двигательных возможностей человека / Н.С. Акиншин, К.А. Анкудинов, А.И. Анкудинов, Е.Б. Карпов, И.Е. Карпов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-2. С. 78-87.

6. Акиншин Р.Н. Вероятностная оценка работоспособности ЕЕПРОМ-памяти микроконтроллеров при синтезе цифровых конечных автоматов / Р.Н. Акиншин, Ю.М. Агафонов, К.А. Анкудинов, А.И. Анкудинов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 8. С. 23-27.

7. Анкудинов А.И., Кравец В.И., Семченко М.Я. Измеритель коэффициента затухания одиночных экспоненциальных радио- и видеоимпульсов // Измерительная техника. 1988. № 8. С. 36-37.

8. Анкудинов А.И., Кравец В.И., Анкудинов К.А. Измерение электромеханической постоянной времени электропривода постоянного тока // Измерительная техника. 1990. № 12. С. 31-32.

9. Анкудинов А.И., Кравец В.И., Анкудинов К.А. Искажения фронта и амплитуды экспоненциальных видеоимпульсов электронным усилителем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1990. Т. 33, № 9. С. 59-64.

10. Анкудинов А.И., Кравец В.И., Анкудинов К.А. Мощный компенсационный двусторонний амплитудный ограничитель // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1991. Т. 34, № 7. С. 53-55.

11. Анкудинов А.И., Кравец В.И., Семченко М.Я., Анкудинов К.А. Устройство для контроля мертвого хода механической передачи электропривода // Авторское свидетельство SU 1677792. Опубликовано: 15.09.1991. Бюл. № 34.

12. Анкудинов К.А. Измерение электромеханической постоянной времени электропривода постоянного тока по амплитуде реакции апериодического звена // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2008. № 6. С. 26-29.

13. Анкудинов К.А. Способ измерения постоянной времени электропривода / К.А. Анкудинов, А.И. Анкудинов, Н.С. Акиншин, О.А. Глаголев, А.В. Емельянов, В.В. Мануйлов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 12. С. 43-49.

14. Ильин А.А., Ильин Р.А., Анкудинов К.А. Математическое обеспечение синтеза математических моделей сложных динамических процессов по выборке данных их предыстории // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 3. С. 305-311.

15. Карпов Е.Б., Карпов И.Е., Карпова Т.Е., Анкудинов К.А., Акиншин А.И., Акиншин О.Н., Акиншин Р.Н. Контроллер зрительно-двигательной реакции человека // Патент на полезную модель RU 132906. Заявка: 30.04.2013. Опубликовано: 27.09.2013. Бюл. № 27.

16. Ankudinov A.I., Kravets V.I., Semchenko M.Ya. Damping factor meter for single exponential radio and video pulses // Measurement Techniques. 1988. Vol. 31, № 8. P. 776-779.

17. Ankudinov A.I., Kravets V.I., Ankudinov K.A. Measurement of the electromechanical time constant of DC electric drives // Measurement Techniques. 1990. Vol. 33, № 12. P. 1229-1231.