

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИТЕРАЦИОННЫХ ТРЕХКАНАЛЬНЫХ СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ТИПОВОЙ НАСТРОЙКОЙ

**Постановка задачи.** В работе [1] приведены варианты структурных схем и результаты компьютерного моделирования графиков основных динамических и точностных характеристик итерационных трехканальных систем управления следящими электроприводами (ЭП) типа «скорость-скорость», «скорость-угол» и «угол-угол» с типовой, в том числе подчиненной, настройкой автономной каналов управления. Такие ЭП позволяют только за счет трехканальной структуры системы управления без дополнительной коррекции динамики кардинально повысить качество слежения не только типовых одноканальных, но и, при необходимости, итерационных двухканальных следящих ЭП. Вместе с тем, в работе не выполнено сравнительная количественная оценка качественных показателей итерационных трехканальных следящих ЭП с различными вариантами типовой настройки каналов, что не позволяет сделать обобщенный аргументированный вывод об эффективности таких ЭП.

**Результаты исследования.** Под трехканальной следящей системой типа «скорость-скорость» понимается замкнутая система управления, скорость на выходе которой пропорциональна входному напряжению. Трехканальная следящая система типа «скорость-угол», по сути, представляет собой комбинированный трехканальный следящий ЭП по углу. Такой ЭП включает в качестве разомкнутого контура управления следящий ЭП по скорости первого, грубого канала К-1, а в качестве замкнутого контура - итерационный двухканальный следящий ЭП по углу на базе второго, компенсирующего К-2 и третьего, точного К-3 каналов с подчиненными контурами скорости. Система типа «угол-угол» - это классический вариант итерационного трехканального следящего ЭП по углу с внутренними подчиненными контурами управления.

Системы типа «скорость - угол» и «угол - угол» могут быть отнесены к позиционным следящим системам, которые наиболее широко распространены для управления автоматизированными следящими ЭП промышленного и специального назначения.

Для сравнительной оценки качества итерационных трехканальных следящих ЭП с типовой настройкой в качестве базовых приводов автономных каналов К-1, К-2, К-3 могут быть приняты глубокорегулируемые следящие ЭП постоянного тока с заданными коэффициентами усиления использованные, например, в механизмах подачи металлорежущих станков. Такие ЭП, в том числе с подчиненным управлением, могут быть построены на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) серий П, ПС, ПГ, ПБВ или ПБСТ мощностью от 0,2 кВт до 20 кВт. Соединение отдельных приводов с общей нагрузкой может осуществляться через два планетарных дифференциальных редуктора. Измерение углов и скоростей вращения в простейшем случае может быть выполнено, например, с помощью сельсинов и тахогенераторов постоянного тока.

При моделировании трехканальных ЭП в качестве исполнительных двигателей (ИД) грубого К-1, компенсирующего К-2 и точного К-3 приводов приняты малоинерционные серийные ДПТ НВ соответственно типов ПГ-9, ПГ-4 и ПГ-2 с широтно-импульсным управлением. Предполагаем, что все ЭП имеют подчиненное управление с типовой настройкой или используют типовые корректирующие устройства (КУ) в основном контуре управления.

Будем предполагать, что при настройках  $i$ -го автономного следящего ЭП по скорости допускается перерегулирование в пределах  $\sigma_i\% \leq 51\%$  ( $i=1,2,3$ ). Тогда для трехканальной системы типа «скорость-скорость» применим автономные каналы управления ЭП со следующей синтезированной типовой настройкой в разомкнутом состоянии.

1. Разомкнутый канал по скорости с активным последовательным дифференцирующим КУ (ДКУ) и подчиненным контуром тока, настроенным на технический оптимум (ТО).
2. Разомкнутый канал по скорости с П-регулятором скорости и подчиненным контуром тока, настроенным на ТО.
3. Разомкнутый канал по скорости с ПИ-регулятором скорости и подчиненным контуром тока, настроенным на ТО.

При настройках автономных позиционных следящих ЭП в системах типа «скорость-угол» и «угол-угол» будем полагать, что управление положением на выходе соответствующего трехканального следящего ЭП должно осуществляться практически без перерегулирования ( $\sigma_{п,3}\% = 0$ ). В этом случае апериодическую настройку динамики отдельных автономных приводов (в первую очередь грубого К1 и компенсирующего К2) полностью получим реализацию поставленного условия по величине перерегулирования в системе без применения дополнительных корректирующих или ограничивающих устройств в каналах управления. Тогда для трехканальных следящих ЭП типа «скорость-угол» и «угол-угол» применим следующие автономные позиционные каналы управления ЭП синтезированной типовой настройкой в разомкнутом состоянии.

4. Разомкнутый канал по положению с активным последовательным дифференцирующим ДКУ и подчиненным контуром скорости, настроенным на ТО.

5. Разомкнутый канал по положению с П-регулятором положения и подчиненным контуром скорости, настроенным на ТО.

6. Разомкнутый канал по положению с П-регулятором положения и подчиненным контуром скорости, настроенным на симметричный оптимум (СО).

Наиболее показательные результаты сравнительной оценки качества итерационных трехканальных следящих ЭП с типовой, в том числе с подчиненной, настройкой каналов управления, полученные без учета нагрузки на выходном валу системы, приведены в табл. 1-11. В таблицах вариант настройки трехканальной следящей системы автоматического управления (САУ) определяется в соответствии с приведенными выше вариантами настроек автономных каналов (см. п.1-6.). Например, вариант «1-1-1» означает, что все три канала системы настроены в соответствии с п.1; вариант «1-4-4» - первый, грубый К-1 настроен в соответствии с п. 1, а компенсирующий К-2 и точный К-3 – в соответствии с п.4, и т.д.

Анализируя результаты сравнительной оценки качества итерационных трехканальных САУ следящими ЭП с типовой настройкой с учетом результатов, полученных в работе [1], можно сделать вывод, что трехканальные следящие ЭП, построенные и функционирующие по итерационному принципу, обладают новыми, кардинально улучшенными качественными показателями по сравнению с традиционными одноканальными типовыми следящими ЭП. Так, трехканальная следящая система типа «скорость-скорость» при любых типовых настройках каналов обладает астатизмом не ниже третьего порядка ( $v_3 \geq 1$ ), при сохранении требуемых запасов устойчивости. При настройке же ее каналов на симметричный оптимум (см. п.3) порядок астатизма достигает  $v_3=6$ , что определяет высочайшую динамическую точность системы, быстродействие даже по сравнению с автономным третьим, точным каналом К-3 возрастает в 1,43 раза, а полоса пропускания расширяется более чем в 2,2 раза по сравнению с одноканальной системой (каналом К-1) (см.табл.1-4).

Трехканальная следящая система типа «скорость-угол» и «угол-угол» при любых типовых настройках автономных каналов обладают астатизмом третьего порядка ( $v_3=3$ ). Практически же в таких системах, как показали исследования, при определенной настройке параметров и применении соответствующих простых корректирующих устройств порядок астатизма может быть повышен до  $v_3=4$ . Полосы пропускания позиционных следящих систем при определенных типовых настройках каналов могут быть расширены более, чем на два порядка по сравнению с одноканальными ЭП (каналом К-1) и достигать почти  $10^3$  Гц ( $\omega_{п,3}=927,9$  Гц) (см. табл. 7,11). При этом с точки зрения повышения динамической точности управления комбинированные итерационные трехканальные системы типа «скорость-угол» оказываются даже более предпочтительными, чем классические итерационные трехканальные системы типа «угол-угол», что подтверждается результатами, приведенными в табл. 6,7 и 10,11. в целом же точность итерационных трехканальных позиционных следящих ЭП типа «скорость-угол» и «угол-угол» практически ограничивается только точностными возможностями передаточных и исполнительных механизмов и устройств, а также разрешающей способностью используемых датчиков основных координат.

**Выводы.** 1. Теоретические и компьютерные исследования показали, что итерационные трехканальные следящие ЭП с типовой настройкой обладают новыми, кардинально улучшенными показателями качества по сравнению не только с традиционными одноканальными типовыми следящими ЭП, но и с итерационными двухканальными следящими системами.

2 Итерационные трехканальные позиционные следящие ЭП с типовой настройкой имеют существенные преимущества типовыми следящими системами в отношении динамической точности, обладая астатизмом не ниже третьего порядка и более, чем в 200 раз большей (при определенных настройках) полосой пропускаемых частот без ухудшения качества переходных процессов в автономных приводах в отдельных каналах.

3. Структура итерационных трехканальных следящих ЭП сравнительно проста, а их расчет не вызывает особых трудностей.

К недостаткам итерационных трехканальных следящих ЭП с типовой настройкой следует отнести необходимость наличия в них трех отдельных приводов требуемой мощности, одного или двух высококачественных дифференциальных редукторов и высокоточного (доли микрона) датчика положения исполнительного органа.

Применение итерационных трехканальных следящих ЭП целесообразно в тех случаях, когда требуется очень высокая динамическая точность воспроизведения задающего воздействия при наличии существенных трудно компенсируемых (в том числе с помощью итерационных двухканальных систем) помех в контуре управления или при значительных нагрузках на выходе одноканальной следящей системы (первого, грубого канала К-1) и сравнительно высокой инерционности ее элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Худяев А.А. Литвиненко Д.Г. Итерационные трехканальные следящие системы с подчиненным управлением// Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» научно-технического журналу «Електроінформ» - Львів: ЕКОінформ, 2009 – с.134-137.

Таблица 1 – Показатели качества переходных процессов (п.п.) в автономных каналах управления трехканальных систем типа «скорость-скорость»

| № системы | Канал управления     | Вариант настройки | Порядок астатизма по зад. возд. $v_i^*(i=1,2,3)$ | Показатели качества п.п. по скорости        |  |  |
|-----------|----------------------|-------------------|--|---|--|--|
|           |                      |                   |  | Перерегулирование: $\sigma_i^*(i=1,2,3),\%$ | Время первого согласования по уровню 0,1% $t_{пс1}^*(i=1,2,3),c$ | Время регулирования по уровню 0,5% $t_{пер1}^*(i=1,2,3),c$ |
| 1         | грубый (К-1)         | 1                 | 1  | 22,5  | $9,883 \cdot 10^{-5}$  | $1,0067 \cdot 10^{-3}$                                     |
|           | компенсирующий (К-2) | 1                 | 1  | 21,5  | $8,2234 \cdot 10^{-5}$   | $8,257 \cdot 10^{-4}$                                      |
|           | точный (К-3)         | 1                 | 1  | 21,5  | $6,1397 \cdot 10^{-5}$   | $6,3391 \cdot 10^{-4}$                                     |
| 2         | грубый (К-1)         | 2                 | 1  | 4,3   | $2,1704 \cdot 10^{-3}$   | $4,9576 \cdot 10^{-3}$                                     |
|           | компенсирующий (К-2) | 2                 | 1  | 4,3   | $1,7367 \cdot 10^{-3}$   | $3,9578 \cdot 10^{-3}$                                     |
|           | точный (К-3)         | 2                 | 1  | 4,3   | $1,268 \cdot 10^{-3}$  | $3,1545 \cdot 10^{-3}$                                     |
| 3         | грубый (К-1)         | 3                 | 2  | 51,5  | $1,5813 \cdot 10^{-3}$   | $9,0138 \cdot 10^{-3}$                                     |
|           | компенсирующий (К-2) | 3                 | 2  | 51,3  | $1,2646 \cdot 10^{-3}$   | $7,2175 \cdot 10^{-3}$                                     |
|           | точный (К-3)         | 3                 | 2  | 50,5  | $9,3084 \cdot 10^{-3}$   | $5,2848 \cdot 10^{-3}$                                     |

Таблица 2 – Показатели качества переходных процессов (п.п.) в двух- и трехканальной системах управления типа «скорость-скорость»(вариант настройки: 3-3-3)

| Система управления                     | Порядок астатизма по зад. возд. $v_i^*(i=1,2,3)$ | Показатели качества п.п. по скорости        |  |  |
|--|--|---|--|--|
|  |  | Перерегулирование: $\sigma_i^*(i=1,2,3),\%$ | Время первого согласования по уровню 0,1% $t_{пс1}^*(i=1,2,3),c$ | Время регулирования по уровню 0,5% $t_{пер1}^*(i=1,2,3),c$ |
| Двухканальная (каналы К-1 и К-2)       | 4  | 111,76                                      | $9,4078 \cdot 10^{-4}$   | 0,0125   |
| Трехканальная (каналы К-1 и К-2 и К-3) | 6  | 145,67                                      | $6,510 \cdot 10^{-4}$  | 0,0149   |

  

| Система управления                     | Выигрыш в быстродействии, раз                |   | Выигрыш во времени регулирования             |   |
|--|--|---|--|---|
|  | По сравнению с автономным точным каналом К-3 | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) | По сравнению с автономным точным каналом К-3 | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) |
| Двухканальная (каналы К-1 и К-2)       | 0,989  | 1   | 0,423  | 1   |
| Трехканальная (каналы К-1 и К-2 и К-3) | 1,43   | 1,445   | 0,355  | 0,839   |

Таблица 3 – Сравнительная оценка точностных свойств одно-, двух- и трехканальной систем управления типа «скорость-скорость»(вариант настройки: 3-3-3) во временной области

| Система управления                    | Статическая ошибка управления по зад. возд. $\epsilon_i^*(i=1,2,3)$ | Динамическая точность  |                     |                     |                     |                     |  |          |   |          |
|---------------------------------------|---|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|----------|---|----------|
|                                       |   | Динамическая ошибка воспроизведения сигнала $u(t)=t^2 \cdot \epsilon_{д,i}(i=1,2,3),c^2$ |                     |                     |                     |                     | Выигрыш в точности, раз                        |          |   |          |
|                                       |   | $t=0,02c$  | $t=1c$              | $t=5c$              | $t=10c$             | $t=20c$             | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1) |          | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) |          |
| одноканальная (канал К-1)             | 0   | $4,5 \cdot 10^{-6}$  | $4,5 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{-6}$ | 1  | 1        | -   | -        |
| двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | 0   | $2,5 \cdot 10^{-10}$   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | $\infty$                                       | $\infty$ | 1   | 1        |
| трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | 0   | $4,0 \cdot 10^{-10}$   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | $\infty$                                       | $\infty$ | $\infty$  | $\infty$ |

Таблица 4 – Сравнительная оценка точностных свойств одно-, двух- и трехканальной систем управления типа «скорость-скорость»(вариант настройки: 3-3-3) в частотной области

| Система управления                    | Качество воспроизведения задания по скорости                                  |                   |  |   |
|---------------------------------------|---|-------------------|--|---|
|                                       | Полоса воспроизводимых частот по уровню 0,707:<br>$\omega_{ni}(i=1,2,3), c^2$ |                   | Расширение полосы пропускания, раз             |   |
|                                       | Гц  | рад/с             | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1) | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) |
| Одноканальная (канал К-1)             | 308,8   | $1,94 \cdot 10^3$ | 1  | -   |
| двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | 493,4   | $3,10 \cdot 10^3$ | 1,598  | 1   |
| трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | 692,3   | $4,35 \cdot 10^3$ | 2,242  | 1,403   |

| Система управления                    | Ошибки воспроизведения гармонического сигнала $u(t)=\sin 2\pi f t$ |   |   |                                  |  |                |               |                |
|---------------------------------------|--|---|---|----------------------------------|--|----------------|---------------|----------------|
|                                       | Величина фазового сдвига (запаздывание по фазе), рад (угл.град)    |   |   |                                  | Уменьшение фазового сдвига (запаздывание по фазе), раз |                |               |                |
|                                       | $f=1\Gamma c$  | $f=4\Gamma c$                                       | $f=10\Gamma c$                                    | $f=50\Gamma c$                   | $f=1\Gamma c$  | $f=10\Gamma c$ | $f=1\Gamma c$ | $f=10\Gamma c$ |
| Одноканальная (канал К-1)             | $7,854 \cdot 10^{-7}$<br>( $4,5 \cdot 10^{-5}$ )                   | $5,655 \cdot 10^{-5}$<br>( $3,24 \cdot 10^{-3}$ )   | $7,98 \cdot 10^{-4}$<br>(0,0457)                  | $8,79 \cdot 10^{-2}$<br>(5,04)   | 1  | 1              | -             | -              |
| Двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | $6,283 \cdot 10^{-11}$<br>( $3,6 \cdot 10^{-9}$ )                  | $8,796 \cdot 10^{-8}$<br>( $5,04 \cdot 10^{-6}$ )   | $8,608 \cdot 10^{-6}$<br>( $4,93 \cdot 10^{-4}$ ) | $1,68 \cdot 10^{-3}$<br>(0,0963) | 12500  | 92,7           | 1             | 1              |
| Трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | $6,28 \cdot 10^{-15}$<br>( $3,6 \cdot 10^{-13}$ )                  | $2,513 \cdot 10^{-12}$<br>( $1,44 \cdot 10^{-10}$ ) | $3,581 \cdot 10^{-8}$<br>( $2,05 \cdot 10^{-6}$ ) | $9,87 \cdot 10^{-4}$<br>(0,0566) | 125063700  | 22284          | 10005         | 240,4          |

Таблица 5 – Показатели качества переходных процессов (п.п.) в двух- и трехканальной системах управления типа «скорость-угол»

| Вариант настройки трехканальной системы | Система управления                     | Порядок астатизма по зад. возд.<br>$\nu_i^*(i=1,2,3)$ | Показатели качества п.п. по скорости            |   |  |
|---|--|---|---|---|--|
|   |  |   | Перерегулирование:<br>$\sigma_i^*(i=1,2,3), \%$ | Время первого согласования по уровню<br>$0,1\% t_{rei}^*(i=1,2,3), c$ | Время регулирования по уровню 0,5%<br>$t_{peri}^*(i=1,2,3), c$ |
| 1-5-5                                   | Двухканальная (каналы К-1 и К-2)       | 2   | 0   | 1,965   | 1,51   |
|   | Трехканальная (каналы К-1 и К-2 и К-3) | 3   | $\approx 0$                                     | $3,225 \cdot 10^{-3}$   | 0,0237   |
| 3-4-4                                   | Двухканальная (каналы К-1 и К-2)       | 2   | 0   | 0,156   | 0,119  |
|   | Трехканальная (каналы К-1 и К-2 и К-3) | 3   | $\approx 0$                                     | $6,0 \cdot 10^{-4}$   | 0,017  |

| Вариант настройки трехканальной системы | Система управления                     | Выигрыш в быстродействии, раз                |   | Выигрыш во времени регулирования, раз        |   |
|---|--|--|---|--|---|
|   |  | По сравнению с автономным точным каналом К-3 | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) | По сравнению с автономным точным каналом К-3 | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) |
| 1-5-5                                   | Двухканальная (каналы К-1 и К-2)       | 0,00172                                      | 1   | 0,00254                                      | 1   |
|   | Трехканальная (каналы К-1 и К-2 и К-3) | 1,041  | 603,7   | 0,162  | 63,71   |
| 3-4-4                                   | Двухканальная (каналы К-1 и К-2)       | 0,00426                                      | 1   | 0,0234                                       | 1   |
|   | Трехканальная (каналы К-1 и К-2 и К-3) | 1,108  | 260   | 0,164  | 7   |

Таблица 6 – Сравнительная оценка точностных свойств одно-, двух- и трехканальной систем управления типа «скорость-угол» во временной области

| Вариант настройки трехканальной системы | Система управления                    | Статическая ошибка управления по зад. возд. $\epsilon_i^*(i=1,2,3)$ | Динамическая точность  |                      |                     |                     |                      |  |          |        |          |  |
|---|---------------------------------------|---|--|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--|----------|--------|----------|--|
|   |                                       |   | Динамическая ошибка воспроизведения сигнала $u(t)=t^2 \cdot \epsilon_{di}(i=1,2,3), c^2$ |                      |                     |                     |                      | Выигрыш в точности по сравнению с одноканальной САУ, раз |          |        |          |  |
|   |                                       |   | (каналом К-1)  |                      |                     |                     |                      | (каналы К-1 и К-2)                                       |          |        |          |  |
|   |                                       |   | $t=1c$   | $t=5c$               | $t=10c$             | $t=12,7c$           | $t=20c$              | $t=1c$   | $t=20c$  | $t=1c$ | $t=20c$  |  |
| 1-5-5                                   | одноканальная (канал К-1)             | 0   | $6,5 \cdot 10^{-5}$  | $3,25 \cdot 10^{-4}$ | $6,6 \cdot 10^{-4}$ | $8,5 \cdot 10^{-4}$ | $1,32 \cdot 10^{-3}$ | 1  | 1        | -      | -        |  |
|   | двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | 0   | $1,8 \cdot 10^{-5}$  | $1,8 \cdot 10^{-5}$  | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | $1,8 \cdot 10^{-5}$  | 3,61   | 73,33    | 1      | 1        |  |
|   | трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | 0   | $3,05 \cdot 10^{-9}$   | 0                    | 0                   | 0                   | 0                    | 21312  | $\infty$ | 5902   | $\infty$ |  |
| 3-4-4                                   | одноканальная (канал К-1)             | 0   | $1,2 \cdot 10^{-5}$  | $4 \cdot 10^{-5}$    | $7,6 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-4}$   | $1,5 \cdot 10^{-4}$  | 1  | 1        | -      | -        |  |

|  |  |   |                     |                      |                      |                      |                      |                  |          |                  |          |
|--|--|---|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|----------|------------------|----------|
|  | двухканальная<br>(каналы К-1 и К-2)      | 0 | $1,6 \cdot 10^{-7}$ | $1,65 \cdot 10^{-7}$ | $1,65 \cdot 10^{-7}$ | $1,65 \cdot 10^{-7}$ | $1,65 \cdot 10^{-7}$ | 75               | 909,1    | 1                | 1        |
|  | трехканальная<br>(каналы К-1, К-2 и К-3) | 0 | $1 \cdot 10^{-12}$  | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | $1,2 \cdot 10^7$ | $\infty$ | $1,6 \cdot 10^5$ | $\infty$ |

Таблица 7 – Сравнительная оценка точностных свойств одно-, двух- и трехканальной систем управления типа «скорость-угол» в частотной области

| Вариант настройки трехканальной системы | Система управления                    | Качество воспроизведения задания по скорости                                |       |   |  |  |  |  |  |  |  |
|---|---------------------------------------|---|-------|---|--|--|--|--|--|--|--|
|   |                                       | Полоса воспроизводимых частот по уровню 0,707: $\omega_{п,i}(i=1,2,3), c^2$ |       | Расширение полосы пропускания                       |  |  |  |  |  |  |  |
|   |                                       | Гц  | рад/с | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1), раз |  |  |  | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2), раз |  |  |  |
| 1-5-5                                   | одноканальная (канал К-1)             | -   | -     | -   |  |  |  |  |  |  |  |
|   | двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | 0,554   | 3,48  | -   |  |  |  |  |  |  |  |
|   | трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | 190,99  | 1200  | -   |  |  |  |  |  |  |  |
| 3-4-4                                   | одноканальная (канал К-1)             | -   | -     | -   |  |  |  |  |  |  |  |
|   | двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | 7,066   | 44,4  | -   |  |  |  |  |  |  |  |
|   | трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | 927,87  | 5830  | -   |  |  |  |  |  |  |  |

| Вариант настройки трехканальной системы | Система управления                    | Ошибки воспроизведения гармонического сигнала $u(t)=\sin 2\pi ft$ |  |  |  |                |   |                |               |                |
|---|---------------------------------------|---|--|--|--|----------------|---|----------------|---------------|----------------|
|   |                                       | Величина фазового сдвига (запаздывание по фазе), рад (угл.град)   |  |  | Уменьшение фазового сдвига (запаздывание по фазе), раз |                |   |                |               |                |
|   |                                       | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1)                    |  |  | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1)         |                | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) |                |               |                |
|   |                                       | $f=1\Gamma c$   | $f=4\Gamma c$                                      | $f=10\Gamma c$                                     | $f=1\Gamma c$  | $f=10\Gamma c$ | $f=1\Gamma c$                                       | $f=10\Gamma c$ | $f=1\Gamma c$ | $f=10\Gamma c$ |
| 1-5-5                                   | одноканальная (канал К-1)             | $2,985 \cdot 10^{-4}$<br>(0,0171)                                 | $1,144 \cdot 10^{-3}$<br>(0,0655)                  | $2,702 \cdot 10^{-3}$<br>(0,1548)                  | 1  | 1              | -   | -              | -             | -              |
|   | двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | $1,948 \cdot 10^{-4}$<br>(0,0112)                                 | $9,5 \cdot 10^{-4}$<br>(0,0544)                    | $2,356 \cdot 10^{-3}$<br>(0,135)                   | 1,532  | 1,147          | 1   | 1              | 1             | 1              |
|   | трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | $1,021 \cdot 10^{-6}$<br>( $5,85 \cdot 10^{-5}$ )                 | $4,273 \cdot 10^{-6}$<br>( $2,448 \cdot 10^{-4}$ ) | $9,425 \cdot 10^{-6}$<br>( $5,4 \cdot 10^{-4}$ )   | 292,4  | 286,6          | 190,8   | 249,9          | 190,8         | 249,9          |
| 3-4-4                                   | одноканальная (канал К-1)             | $4,398 \cdot 10^{-5}$<br>( $2,52 \cdot 10^{-3}$ )                 | $2,011 \cdot 10^{-4}$<br>(0,0115)                  | $1,1312 \cdot 10^{-3}$<br>(0,0649)                 | 1  | 1              | -   | -              | -             | -              |
|   | двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | $1,175 \cdot 10^{-5}$<br>( $6,73 \cdot 10^{-4}$ )                 | $5,781 \cdot 10^{-4}$<br>(0,0331)                  | $3,46 \cdot 10^{-3}$<br>(0,198)                    | 3,21   | 0,327          | 1   | 1              | 1             | 1              |
|   | трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | $6,28 \cdot 10^{-9}$<br>( $3,6 \cdot 10^{-7}$ )                   | $2,262 \cdot 10^{-6}$<br>( $1,3 \cdot 10^{-4}$ )   | $1,0367 \cdot 10^{-4}$<br>( $5,94 \cdot 10^{-3}$ ) | 6003   | 10,91          | 1871  | 33,38          | 1871          | 33,38          |

Таблица 8 – Показатели качества переходных процессов (п.п.) в автономных каналах управления трехканальных систем типа «угол-угол»

| № системы | Канал управления     | Вариант настройки | Порядок астатизма по зад. возд. $\nu_i^*(i=1,2,3)$ | Показатели качества п.п. по скорости        |  |  |
|-----------|----------------------|-------------------|--|---|--|--|
|           |                      |                   |  | Перерегулирование: $\sigma_i^*(i=1,2,3),\%$ | Время первого согласования по уровню 0,1% $t_{сг1}^*(i=1,2,3),c$ | Время регулирования по уровню 0,5% $t_{рег1}^*(i=1,2,3),c$ |
| 1         | грубый (К-1)         | 4                 | 1  | 0   | 0,350  | 0,266  |
|           | компенсирующий (К-2) | 4                 | 1  | 0   | 0,278  | 0,213  |
|           | точный (К-3)         | 4                 | 1  | 0   | $6,65 \cdot 10^{-4}$   | $2,785 \cdot 10^{-3}$                                      |
| 2         | грубый (К-1)         | 5                 | 1  | 0   | 4,60   | 3,53   |
|           | компенсирующий (К-2) | 5                 | 1  | 0   | 3,46   | 2,65   |
|           | точный (К-3)         | 5                 | 1  | 0,5   | $3,388 \cdot 10^{-3}$  | $3,83 \cdot 10^{-3}$                                       |
| 3         | грубый (К-1)         | 6                 | 1  | 0   | 5,56   | 4,245  |
|           | компенсирующий (К-2) | 6                 | 1  | 0   | 3,94   | 3,03   |
|           | точный (К-3)         | 6                 | 1  | 0   | 0,0242   | 0,0185   |

Таблица 9 – Показатели качества переходных процессов (п.п.) в двух- и трехканальной системах управления типа «угол-угол»

| Система управления                     | Порядок астатизма по зад. возд. $v_i^*(i=1,2,3)$ | Показатели качества п.п. по скорости        |  |   |
|--|--|---|--|---|
|  |  | Перерегулирование: $\sigma_i^*(i=1,2,3),\%$ | Время первого согласования по уровню 0,1% $t_{\text{сгл}}^*(i=1,2,3),\text{с}$ | Время регулирования по уровню 0,5% $t_{\text{рег}}^*(i=1,2,3),\text{с}$ |
| Двухканальная (каналы К-1 и К-2)       | 2  | 13,2  | 0,0448   | 0,321   |
| Трехканальная (каналы К-1 и К-2 и К-3) | 3  | $\approx 0$                                 | $5,998 \cdot 10^{-4}$  | 0,0215  |

| Система управления                     | Выигрыш в быстродействии, Ра                  |   | Выигрыш во времени регулирования, ра         |   |
|--|---|---|--|---|
|  | По сравнению с автономным точным каналом К-3з | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) | По сравнению с автономным точным каналом К-3 | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) |
| Двухканальная (каналы К-1 и К-2)       | 0,0148  | 1   | 0,00867                                      | 1   |
| Трехканальная (каналы К-1 и К-2 и К-3) | 1,108   | 74,69   | 0,1295                                       | 14,93   |

Таблица 10 – Сравнительная оценка точностных свойств одно-, двух- и трехканальной систем управления типа «угол-угол»(вариант настройки: 4-4-4) во временной области

| Система управления                    | Статическая ошибка управления по зад. возд. $\epsilon_i^*(i=1,2,3)$ | Динамическая точность  |                    |                   |                   |                   |   |  |                |          |
|---------------------------------------|---|--|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---|--|----------------|----------|
|                                       |   | Динамическая ошибка воспроизведения сигнала $u(t)=t^2 \cdot \epsilon_{\text{д},i}(i=1,2,3),\text{с}^2$ |                    |                   |                   |                   | Выигрыш в точности                                  |  |                |          |
|                                       |   | $t=0,02\text{с}$   | $t=1\text{с}$      | $t=5\text{с}$     | $t=10\text{с}$    | $t=20\text{с}$    | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1), раз | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2), раз |                |          |
|                                       |   | $t=1\text{с}$  | $t=20\text{с}$     | $t=1\text{с}$     | $t=20\text{с}$    | $t=1\text{с}$     | $t=20\text{с}$                                      | $t=1\text{с}$  | $t=20\text{с}$ |          |
| Одноканальная (канал К-1)             | 0   | $3,5 \cdot 10^{-4}$  | 0,095              | 0,495             | 0,995             | 2,06              | 1   | 1  | -              | -        |
| двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | 0   | $2,9 \cdot 10^{-4}$  | $4 \cdot 10^{-3}$  | $4 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ | 23,75   | 515  | 1              | 1        |
| трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | 0   | $5,93 \cdot 10^{-6}$   | $1 \cdot 10^{-10}$ | 0                 | 0                 | 0                 | $9,5 \cdot 10^8$                                    | $\infty$   | $4 \cdot 10^7$ | $\infty$ |

Таблица 11 – Сравнительная оценка точностных свойств одно-, двух- и трехканальной систем управления типа «угол-угол»(вариант настройки: 4-4-4) в частотной области

| Система управления                    | Качество воспроизведения задания по скорости   |       |  |   |
|---------------------------------------|--|-------|--|---|
|                                       | Полоса воспроизводимых частот по уровню 0,707: $\omega_{\text{п},i}(i=1,2,3),\text{с}^2$ |       | Расширение полосы пропускания, раз             |   |
|                                       | Гц   | рад/с | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1) | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2) |
| Одноканальная (канал К-1)             | 3,167  | 19,9  | 1  | -   |
| двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | 8,754  | 55    | 2,764  | 1   |
| трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | 923,1  | 5800  | 291,46   | 105,45  |

| Система управления                    | Ошибки воспроизведения гармонического сигнала $u(t)=\sin 2\pi f t$ |                                   |  |                  |   |                 |  |                 |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|--|------------------|---|-----------------|--|-----------------|
|                                       | Величина фазового сдвига (запаздывание по фазе), рад (угл.град)    |                                   |  |                  | Уменьшение фазового сдвига (запаздывание по фазе)   |                 |  |                 |
|                                       | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1), раз                |                                   | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2), раз |                  | По сравнению с одноканальной САУ (каналом К-1), раз |                 | По сравнению с двухканальной САУ (каналы К-1 и К-2), раз |                 |
|                                       | $f=1\text{Гц}$   | $f=4\text{Гц}$                    | $f=10\text{Гц}$  | $f=50\text{Гц}$  | $f=1\text{Гц}$                                      | $f=10\text{Гц}$ | $f=1\text{Гц}$   | $f=10\text{Гц}$ |
| Одноканальная (канал К-1)             | 0,304<br>(17,42)   | 0,8922<br>(51,12)                 | 1,244<br>(71,28)   | 1,404<br>(80,45) | 1   | 1               | -  | -               |
| двухканальная (каналы К-1 и К-2)      | 0,0364<br>(2,086)  | 0,53<br>(30,37)                   | 1,043<br>(59,76)   | 1,367<br>(78,33) | 8,35  | 1,193           | 1  | 1               |
| трехканальная (каналы К-1, К-2 и К-3) | $9,425 \cdot 10^{-5}$<br>( $5,4 \cdot 10^{-3}$ )                   | $4,272 \cdot 10^{-4}$<br>(0,0245) | 0,0102<br>(0,5845)                                       | 0,0754<br>(4,32) | 3225,5  | 122             | 386,2  | 102,3           |