

# ИНТЕГРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО СИНХРОНИЗАЦИИ С ПСЕВДОСЛЕДЯЩЕЙ ФИКСАЦИЕЙ ТОЧЕК ЕСТЕСТВЕННОЙ КОММУТАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

*Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, А.В. Тюгаев*

Рассматривается интегрирующее устройство синхронизации (УС) с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети. Устройство предназначено для вентильных преобразователей, работающих в условиях высокого уровня внешних помех и коммутационных искажений напряжения сети.

Проведено моделирование УС и получены рекомендации по выбору соотношения частоты собственных автоколебаний развертывающего преобразователя и частоты напряжения сети. Показано, что устройство синхронизации обладает высокой помехоустойчивостью со стороны синхронизирующего канала, а также свойством адаптации к колебаниям амплитуды напряжения сети. Объяснены причины, по которым данный тип УС не рекомендуется использовать в системах управления с питанием от автономных источников электроснабжения, где «просадки» напряжения сети могут сопровождаться нестабильностью его частоты. Даны практические рекомендации по выбору параметров УС и рациональным областям его применения.

*Ключевые слова:* устройство синхронизации, вентильный преобразователь, развертывающий преобразователь, интегратор, релейный элемент.

## Введение

Современные энергосистемы как стационарного, так и автономного базирования характеризуются высоким уровнем искажений с трудно-предсказуемыми параметрами, зачастую выходящими за допустимые нормы искажений и играющими роль дестабилизирующих факторов в работе не только вентильных преобразователей (ВП), но и технологических установок в целом [1–7]. Поэтому создание систем управления ВП, способных частично или полностью адаптироваться к изменяющимся параметрам сети, является актуальной задачей, направленной на повышение надежности работы всего комплекса электротехнического оборудования промышленных предприятий.

Одним из наиболее уязвимых с позиций помехоустойчивости каналов систем управления ВП являются устройства синхронизации (УС), которые в большинстве практических случаев представляют собой каскадное включение сглаживающего фильтра, например, апериодического первого порядка и релейного элемента с симметричными относительно нулевого уровня порогами переключения [8, 9]. Недостаток подобных УС очевиден – при изменениях амплитуды и/или частоты напряжения сети заданный угол синхронизации существенно меняется, что сказывается на характеристиках ВП в целом, а в ряде случаев может привести к его аварийному отключению [9–11]. Проблема помехоустойчивости контуров синхронизации ВП, в частности, в автоматизированном электроприводе постоянного тока, за последнее время в немалой степени обострилась благодаря широкому внедрению преобразователей частоты в электроприводах переменного тока, генерирующих в сеть высоко-

частотные гармоники широтно-импульсной модуляции, не связанные по кратности с частотой напряжения сети.

Применение методов интегрирующего развертывающего преобразования для синхронизации систем импульсно-фазового управления ВП является одним из эффективных способов повышения их помехоустойчивости, статической и динамической точности [11–18].

Ниже рассматривается интегрирующее УС [19], сочетающее в себе высокую помехоустойчивость, простоту технической реализации и способность адаптироваться к колебаниям напряжения сети.

## Теоретическая часть

Функциональная схема УС (рис. 1, а) содержит три идентичных канала синхронизации «А», «В», «С», связывающих трехфазную систему напряжений А, В, С с их инверсными шинами  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$ , а также схему логики, которая включает в себя компараторы К1–К6 и логические элементы Л1–Л3 функции «2И». С помощью схемы логики выделяется сигнал логической «1», длительность которого определяет разрешенный интервал управления силовыми ключами ВП.

В данном случае в качестве примера рассматривается УС для трехфазного ВП с нулевым выводом, хотя путем соответствующего изменения схемы логики может быть получен сигнал синхронизации для любой конфигурации силового блока ВП.

Каналы синхронизации «А», «В», «С» выполнены на основе двух последовательно включенных интегрирующих развертывающих преобразователей (РП) (рис. 1, б).

Каждый из РП1, РП2 включает в себя сумматор  $\Sigma$ , интегратор И и релейный элемент РЭ

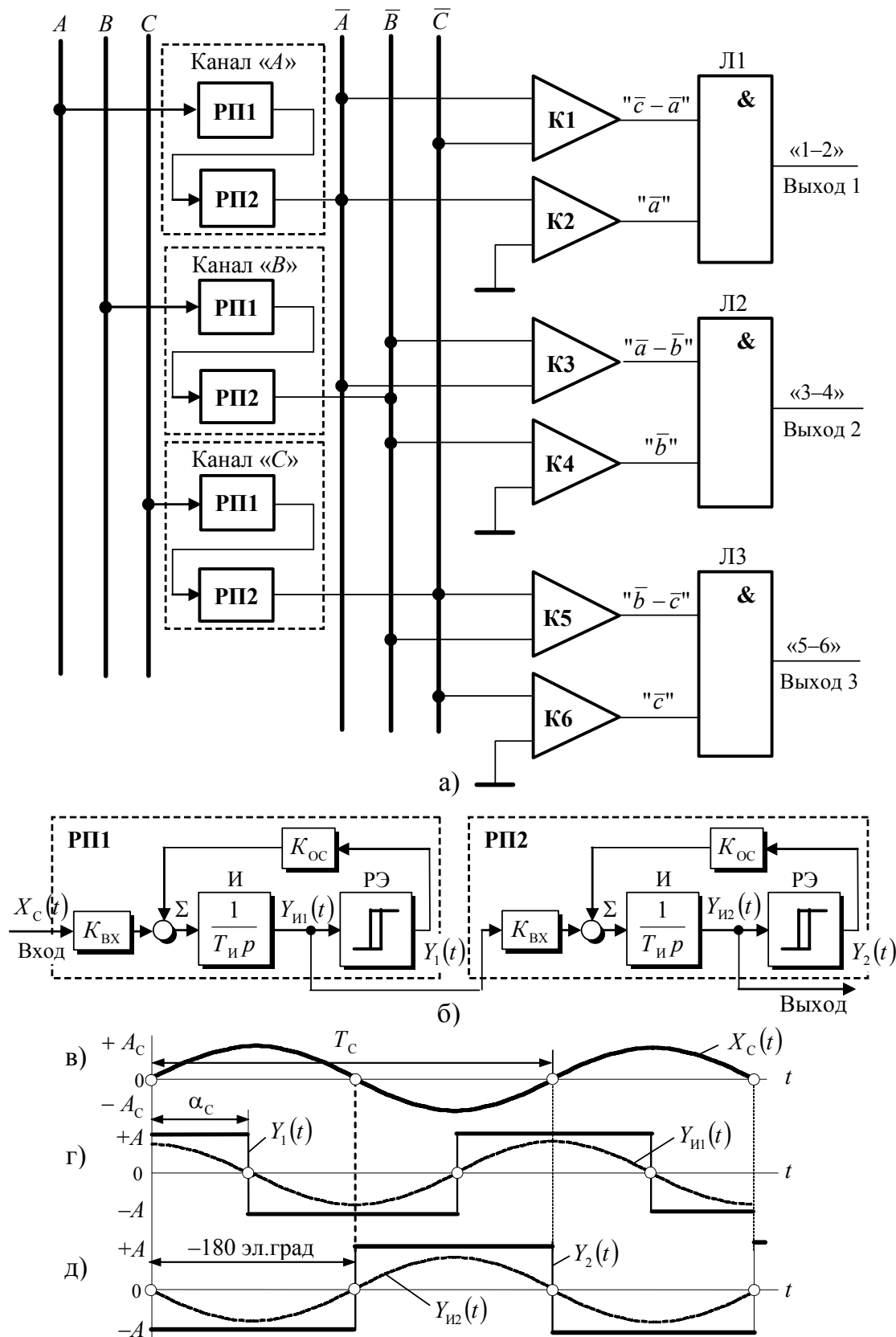


Рис. 1. Функциональная схема интегрирующего устройства синхронизации с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети (а), структурная схема каскадного включения развертывающих преобразователей (б) и его временные диаграммы сигналов (в-д)

с порогами переключения  $\pm b$  и симметричной относительно «нуля» петлей гистерезиса. Выходной сигнал РЭ меняется дискретно в пределах  $\pm A$ . Звенья  $k_{ос}$  и  $k_{вх}$  являются пропорциональными и определяют коэффициент усиления РП1 и РП2 по отношению к входному сигналу.

В общем случае РП представляет собой замкнутую автоколебательную систему с частотно-широотно-импульсной модуляцией. Ее особенность заключается в том, что при соблюдении определенных условий она может переходить в режим вынужденных переключений (синхронизации) с внешним периодическим сигналом и преобразовываться из частотно-широотно-импульсной в широтно-импульсную систему.

При этом наиболее часто для внешней синхронизации РП используется непосредственно напряжение сети, либо прямоугольные биполярные импульсы со средним нулевым значением, получаемые путем преобразования синусоидального сигнала с помощью компаратора.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что условием синхронизации РП прямоугольными биполярными импульсами является [9, 11, 20]

$$\bar{A}_C \geq |\bar{T}_0 - 1|, \quad (1)$$

где  $\bar{A}_C = |A_C / A|$  – нормированная амплитуда  $A_C$  прямоугольного сигнала синхронизации (кратность синхронизации);  $\bar{T}_0 = T_0 / T_C$  – нормирован-

ное значение периода собственных автоколебаний  $T_0 = 4\bar{b}T_{И}$  РП, когда  $A_C = 0$  по отношению к периоду  $T_C$  синхронизирующего сигнала  $X_C(t)$ ;  $\bar{b} = |b / A|$  – нормированное значение порогов переключения РЭ;  $\pm A$  – амплитуда выходных импульсов РЭ;  $T_{И}$  – постоянная времени интегратора РП.

Аналогично для гармонического сигнала вида  $X_C(t) = A_C \sin(\omega t)$  условием внешней синхронизации является

$$\bar{A}_C \geq 0,5\pi \cdot |\bar{T}_0 - 1|. \quad (2)$$

Решение неравенств (1)–(2) представлено в виде графика зависимости  $\bar{A}_C = f(\bar{T}_0)$  (рис. 2, а), анализ которого позволяет сделать следующие выводы:

- при  $\bar{T}_0 \ll 1,0$  глубину синхронизации РП прямоугольными импульсами следует выбирать из условия  $\bar{A}_C \geq 1,0$ , а для гармонического сигнала – из условия  $\bar{A}_C \geq \pi/2$ . В противном случае РП переходит в режим собственных автоколебаний;

- при  $\bar{T}_0 > 1,0$  уровень  $\bar{A}_C$ , требуемый для синхронизации РП как прямоугольными импульсами, так и гармоническим сигналом, резко возрастает. Это объясняется тем, что для синхронизации РП с низкой собственной частотой  $(T_0)^{-1}$  высокочастотным синхронизирующим сигналом с частотой  $(T_C)^{-1}$  требуется увеличивать  $\bar{A}_C$  так,

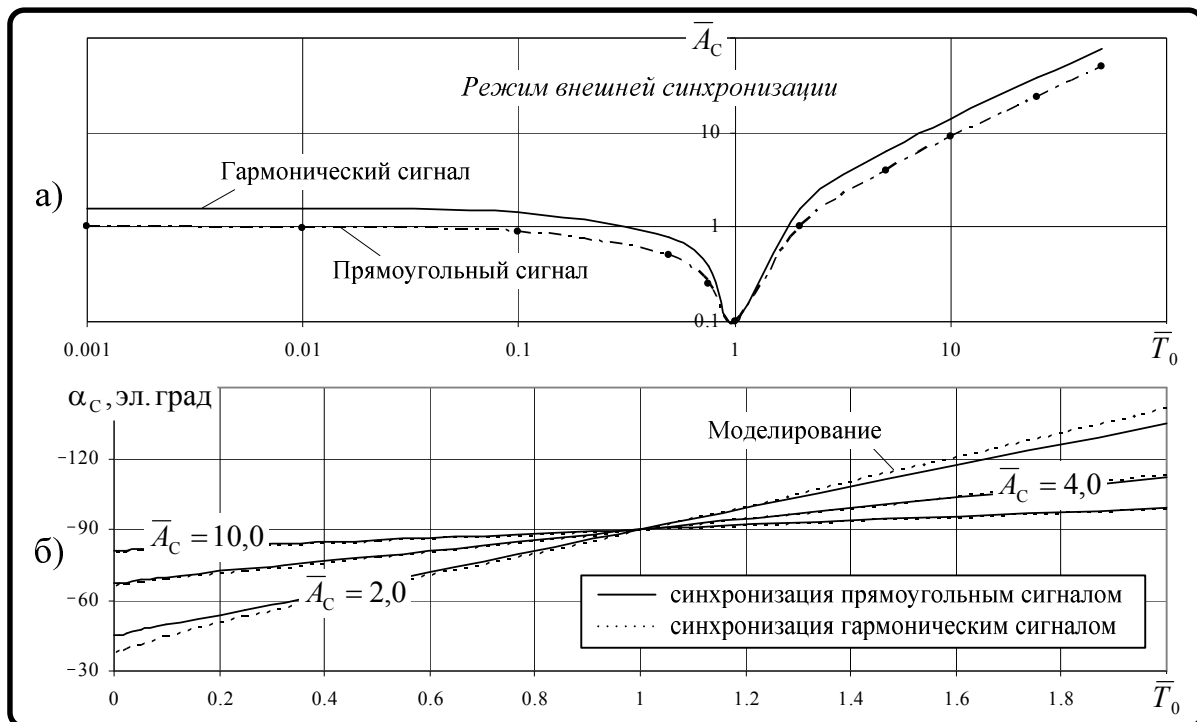


Рис. 2. Графики зависимостей  $\bar{A}_C = f(\bar{T}_0)$  (а) и  $\alpha_C = f(\bar{T}_0)$  (б) для развертывающего преобразователя, работающего в режиме внешней синхронизации

чтобы всегда выполнялось равенство модуля вольт-секундных площадей ( $S_C = |A_C \cdot T_C| > (S = |A \cdot T_0|)$ ). В противном случае частота  $(T_0)^{-1}$  импульсов на выходе РП будет меньше частоты  $(T_C)^{-1}$  сигнала синхронизации  $X_C(t)$ ;

– при  $\bar{T}_0 = 1,0$  уровень  $\bar{A}_C$  стремится к нулю, поэтому частоту собственных автоколебаний  $(T_0)^{-1}$  в РП целесообразно выбирать вблизи значения частоты  $(T_C)^{-1}$  синхронизирующего воздействия  $X_C(t)$ .

Фазовый сдвиг (угол синхронизации  $\alpha_C$ ) между синхронизирующим воздействием  $X_C(t)$  и выходными импульсами  $Y_1(t)$ , например, РП1 (рис. 1, в–г) зависит от нормированного значения периода  $\bar{T}_0 = T_0 / T_C$  собственных автоколебаний и глубины синхронизации  $\bar{A}_C$

$$\alpha_C = -90 \text{ эл.град.} \cdot \left[ 1 + \frac{\bar{T}_0 - 1}{\bar{A}_C} \right]. \quad (3)$$

Как показали результаты исследований, выражение (3) справедливо для РП, синхронизирующего при помощи прямоугольных биполярных импульсов. Графическое отображение (3) представлено в виде зависимости  $\bar{A}_C = f(\bar{T}_0)$  (рис. 2, б), анализ которой позволяет сделать следующие выводы:

– при  $\bar{T}_0 \neq 1,0$  чувствительность  $\alpha_C$  к отклонению частоты  $(T_C)^{-1}$  синхронизирующего напряжения  $X_C(t)$  от номинального значения  $\bar{T}_0 = 1,0$  возрастает по мере уменьшения глубины синхронизации  $\bar{A}_C = |A_C / A|$ . Так, например, при  $\bar{A}_C = 10,0$  и  $\bar{T}_0 = 1,0 \pm 10\%$  ошибка угла синхронизации  $\alpha_C$  пренебрежимо мала, а в случае  $\bar{A}_C = 4,0$  составляет порядка  $\pm 3,0$  эл. град;

– при  $\bar{T}_0 = 1,0$ , когда частота собственных автоколебаний  $(T_0)^{-1} = 1/4bT_{И}$  РП равна частоте  $(T_C)^{-1}$  сигнала синхронизации, и при любых значениях  $\bar{A}_C$  угол синхронизации  $\alpha_C$  всегда остается постоянным и равным  $-90$  эл. град. Это придает РП свойства адаптации к нестабильности амплитуды напряжения сети.

Моделирование в среде *MatLab+Simulink* выявило, что в случае синхронизации РП гармоническим сигналом выражение (3) для угла синхронизации  $\alpha_C$  остается справедливым только при условии  $\bar{A}_C \geq 4,0$  (рис. 2, б). Для случая  $\bar{A}_C < 4,0$  вычисление угла  $\alpha_C$  по уравнению (3) допустимо с погрешностью, не превышающей  $\pm 5\%$ .

В режиме внешней синхронизации, когда роль несущей частоты выполняет, например, гармонический сигнал  $X_C(t)$ , РП имеет свойства, близкие к апериодическому фильтру первого порядка  $W(p) = 1/(1 + T_3 p)$  с постоянной времени

$T_3 \approx \pi \cdot T_C \cdot \bar{A}_C / 16$ , автоматически перестраиваемой в функции параметров синхронизирующего воздействия (напряжения сети) [21, 22]. Это указывает на высокую помехоустойчивость РП, работающего в режиме внешней синхронизации, по отношению к высшим гармоникам и коммутационным искажениям напряжения сети. Однако следует иметь в виду, что подобная «линеаризация» РП справедлива только для области частот входных воздействий  $f_{ВХ} \leq 0,5(f_C = 1/T_C)$ , выше которой развертывающий преобразователь, как и любая импульсная система, переходит в режим замедленной дискретизации динамической составляющей входного сигнала [23, 24].

При каскадном включении РП1 и РП2 (рис. 1, б) каналы синхронизации работают следующим образом.

С помощью гармонического воздействия  $X_C(t) = A_C \sin(\omega t)$  (рис. 1, в, например, фазы А) РП1 переводится из автоколебательного режима в режим внешней синхронизации, когда на его выходе формируются импульсы  $Y_1(t)$  (рис. 1, г), сдвинутые относительно сигнала  $X_C(t)$  на угол  $\alpha_C = -90$  эл. град. Выходной сигнал  $Y_{И1}(t)$  (рис. 1, г) интегратора РП1 имеет форму синусоиды и является сигналом синхронизации для РП2.

Перевод РП2 в режим синхронизации с РП1 позволяет получить на выходе второго интегратора гармоническое воздействие  $Y_{И2}(t)$ , сдвинутое относительно сигнала  $X_C(t)$  на величину  $-180$  эл. град (рис. 1, в–д), что является инверсией соответствующей фазы напряжения сети.

Таким образом, с помощью каналов синхронизации «А», «В», «С» (рис. 1, а) формируется инверсная по отношению к последовательности фаз А, В, С (рис. 3, а) система напряжений  $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$  (рис. 3, б).

Компараторы К1, К3, К5 попарно сравнивают напряжения фаз  $\bar{C} - \bar{A}$ ,  $\bar{A} - \bar{B}$  и  $\bar{B} - \bar{C}$  (рис. 3, б) соответственно и формируют на выходе импульсы « $\bar{c} - \bar{a}$ » (рис. 3, в), « $\bar{a} - \bar{b}$ » (рис. 3, е) и « $\bar{b} - \bar{c}$ » (рис. 3, и). Компараторы К2, К4 и К6 формируют сигналы « $\bar{a}$ », « $\bar{b}$ », « $\bar{c}$ » (рис. 3, г, ж, к), фиксирующие моменты времени перехода соответствующей фазой  $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$  через нулевой уровень (рис. 3, б).

Далее, с помощью логических элементов Л1–Л3 функции «2И» (рис. 1, а) полученные сигналы сравниваются, в результате чего на выходах 1...3 УС формируются импульсы «1–2», «3–4», «5–6» (рис. 3, д, з, л), длительность которых ограничена точками естественной коммутации 1–2, 3–4, 5–6 системы напряжений А, В, С (рис. 3, а), т.е. диапазоном регулирования угла управления силовыми вентилями трехфазного ВП с нулевым выводом. Например, для синхронизации реверсивного мостового ВП можно воспользоваться непосредствен-

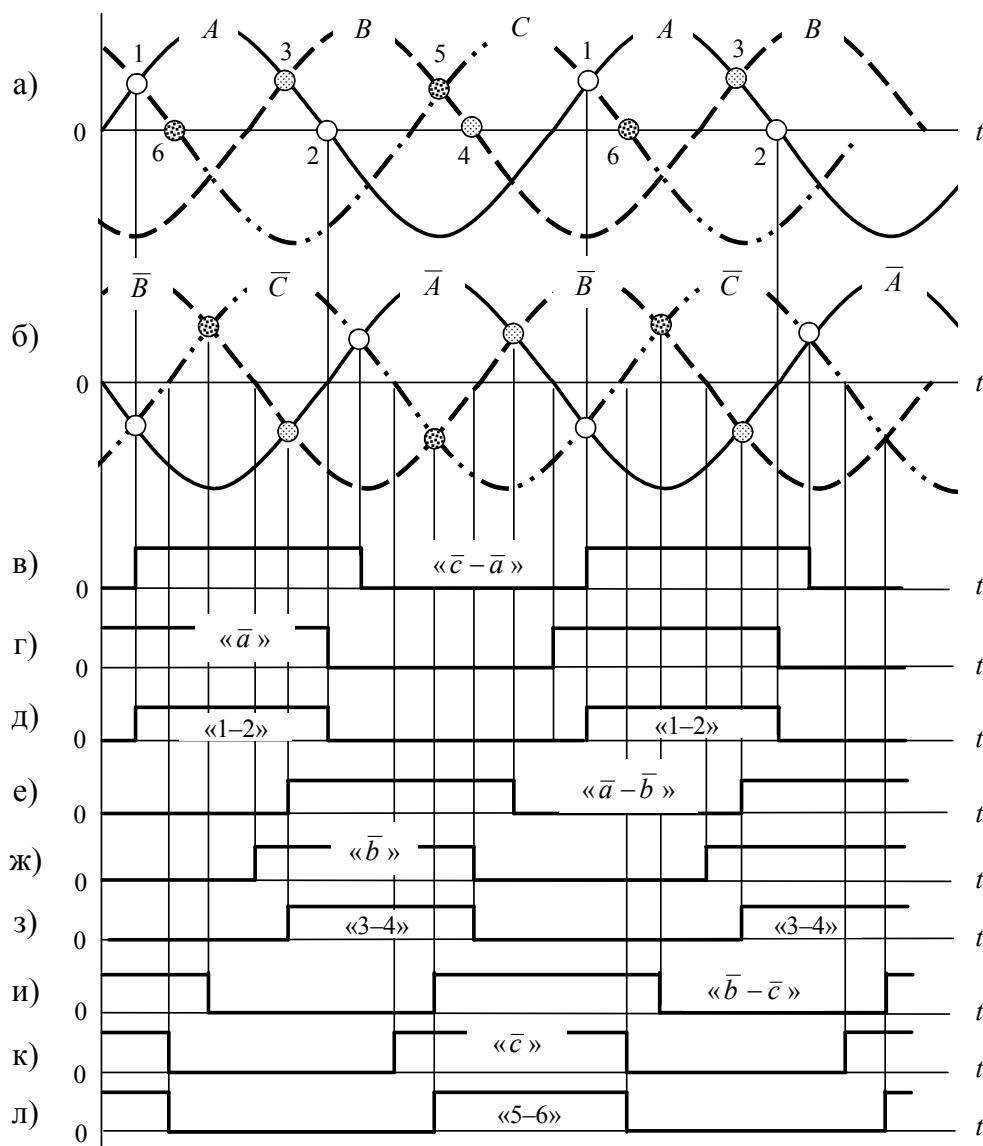


Рис. 3. Временные диаграммы сигналов интегрирующего устройства синхронизации с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети

но сигналами « $\bar{c} - \bar{a}$ », « $\bar{a} - \bar{b}$ », « $\bar{b} - \bar{c}$ » (рис. 3, а, в, е, и), а однофазный ВП может работать с выходным сигналом соответствующего из компараторов К2, К4, К6 (рис. 3, а, г, ж, к).

#### Практические рекомендации

Очевидно, что при колебаниях амплитуды напряжения сети (рис. 3, а) система синхронизации будет отслеживать положение точек естественной коммутации фаз  $A, B, C$  с запаздыванием, обусловленным инерционностью каскада РП1–РП2 (рис. 1, б). Поэтому с этих позиций существенно увеличивать глубину синхронизации  $\bar{A}_C$  развертывающих преобразователей РП1, РП2 нецелесообразно. С другой стороны, ослабление фильтрующих свойств РП1, РП2 за счет умень-

шения величины  $\bar{A}_C$  чревато снижением помехоустойчивости ВП и возникновением потенциальной опасности его аварийного отключения из-за импульсных помех со стороны источника электроснабжения. Поэтому величина  $\bar{A}_C$  для РП1 и РП2 оптимизируется в период пуско-наладочных работ на объекте. Как показала практика, для РП1 глубина синхронизации составляет порядка  $\bar{A}_C = 2,5 - 4,0$ . Для сильно искаженных сетей эта величина может достигать до  $\bar{A}_C = 10,0$ . Что касается РП2, то его синхронизация обычно находится на уровне  $\bar{A}_C = 1,7 - 2,0$ . Объясняется это тем, что гармонический сигнал  $Y_{in}(t)$  (рис. 1, г) оказывается в достаточной степени сглаженный первым РП и нет смысла неоправданно увеличивать

постоянную времени всего каскада синхронизации РП1–РП2.

Недостатком рассмотренного УС является его псевдоследящий режим, когда положение точек естественной коммутации отслеживается не по исходной системе напряжений  $A, B, C$ , а после ее преобразования в систему  $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ . Это делает малоприменимым данный принцип синхронизации на объектах с проблемной «сетью», где колебания амплитуды фазных напряжений могут сопровождаться девиацией частоты напряжения сети. В этом случае можно попытаться решить проблему за счет УС прямого слежения за точками естественной коммутации [25], которое, естественно, уступает рассмотренному УС по уровню своей помехоустойчивости.

### Выводы

1. Рассмотрена структура УС с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети, в основе которой лежит принцип интегрирующего развертывающего преобразования. Проведено моделирование УС и получены рекомендации по выбору соотношения частот собственных автоколебаний развертывающего преобразователя и частоты напряжения сети.

2. Показано, что УС обладает свойством адаптации к колебаниям амплитуды напряжения сети, а также объяснены причины, по которым данный тип УС не рекомендуется использовать в системах управления с питанием от автономных источников электроснабжения, где «просадки» напряжения сети могут сопровождаться нестабильностью его частоты.

3. Даны практические рекомендации по выбору параметров УС и рациональным областям его применения.

### Литература

1. Осипов, О.И. *Техническое диагностирование автоматизированного электропривода постоянного тока*: дис. ... д-ра техн. наук / О.И. Осипов. – Челябинск: ЧПИ, 1995. – 405 с.

2. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2011. – Вып. 15. – № 15(232). – С. 40–45.

3. Развитие частотных методов синтеза электроприводов с синхронными электрическими машинами / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2011. – Вып. 16. – № 34(251). – С. 21–27.

4. Усынин, Ю.С. *Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // *Электротехника*. – 2013. – № 3. – С. 37–43.

5. *Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станков холодной прокатки труб* / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 107–110.

6. *Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 38–41.

7. *Параметрическая оптимизация частотнорегулируемых электроприводов* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьева, А.Н. Шишков и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 30–33.

8. Чернов, Е.А. *Комплектные электроприводы станков с ЧПУ: справочное пособие* / Е.А. Чернов, В.П. Кузьмин. – Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1989. – 320 с.

9. Дудкин, М.М. *Элементы информационной электроники систем управления вентильными преобразователями: монография* / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – 362 с.

10. *Реверсивный тиристорный преобразователь для систем управления с питанием от сети с нестационарными параметрами* / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // *Практическая силовая электроника*. – 2009. – № 2 (34). – С. 35–41.

11. Качалов, А.В. *Интегрирующие устройства синхронизации для систем импульсно-фазового управления вентильными преобразователями* / А.В. Качалов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // *Практическая силовая электроника*. – 2010. – № 1 (37). – С. 42–51.

12. *Адаптивная система синхронизации трехфазного мостового реверсивного тиристорного преобразователя* / Л.И. Цытович, А.В. Качалов, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2009. – Вып. 11. – № 15(148). – С. 45–50.

13. Дудкин, М.М. *Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей* / М.М. Дудкин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2013. – Вып. 13. – № 1. – С. 5–18.

14. *Адаптивная интервало-кодовая двоично-десятичная интегрирующая синхронизация систем управления силовыми вентильными преобразователями* / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин // *Электротехника*. – 2013. – № 3. – С. 8–15.

15. Пат. 2400910 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 М 1/08. *Адаптивное устройство синхронизации* / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматулин. – № 2009113408/09; заявл. 09.04.09; опубл. 27.09.10, Бюл. № 27.

16. Пат. 2422974 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 М 1/08. Интегрирующее устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов. – № 2009147064/09; заявл. 17.12.09; опубл. 27.06.11, Бюл. № 18.

17. Пат. 2461948 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> Н 02 М 1/08. Устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, О.Г. Брылина, Р.М. Рахматуллин. – № 2011117488/07; заявл. 29.04.11; опубл. 20.09.12, Бюл. № 26.

18. Пат. 2465709 Российская Федерация. МПК<sup>7</sup> Н 02 М 1/08. Устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Р.М. Рахматуллин. – № 2011141445/07; заявл. 12.10.11; опубл. 27.10.12, Бюл. № 30.

19. Пат. 2449456 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 М 1/08. Интегрирующее устройство синхронизации / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, А.В. Качалов, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматуллин, И.Р. Муфтеев. – № 2011108851/07; заявл. 9.03.11; опубл. 27.04.12, Бюл. № 12.

20. Брылина, О.Г. Многозонный частотно-широотно-импульсный регулятор переменного напряжения / О.Г. Брылина, Л.И. Цытович,

М.М. Дудкин // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. – № 6 (42). – С. 35–39.

21. Цытович, Л.И. Развертывающий операционный усилитель с перестраиваемой полосой пропускания / Л.И. Цытович // Приборы и техника эксперимента. – М.: АН СССР, 1979. – № 4. – С. 149–152.

22. Интегрирующие развертывающие преобразователи с повышенной температурной стабильностью характеристик / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 10. – С. 38–43.

23. Темников, Ф.Е. Математические развертывающие системы / Ф.Е. Темников, В.Е. Славинский. – М.: Энергия, 1970. – 120 с.

24. Активные фильтры / Л.П. Хьюлсман; пер. с англ. под ред. И.Н. Теплока. – М.: Мир, 1972. – 516 с.

25. Пат. 2400911 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> Н 02 М 1/08. Устройство синхронизации / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, А.В. Качалов, Р.М. Рахматуллин. – № 2009113987/09; заявл. 13.04.09; опубл. 27.09.10, Бюл. № 27.

**Цытович Леонид Игнатьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-85, e-mail: [tsli@susu.ac.ru](mailto:tsli@susu.ac.ru)

**Дудкин Максим Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-21, e-mail: [dudkinmax@mail.ru](mailto:dudkinmax@mail.ru)

**Брылина Олеся Геннадьевна**, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-21, e-mail: [teolge@mail.ru](mailto:teolge@mail.ru)

**Тюгаев Антон Валерьевич**, аспирант, кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8 (351) 267-93-21, e-mail: [atuugaev@gmail.com](mailto:atuugaev@gmail.com)

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Power Engineering"  
2013, vol. 13, no. 2, pp. 53–61**

---

## **INTEGRATING LOCKER WITH PSEUDO-FOLLOWING BY FIXING OF NATURAL SWITCHING POINTS OF SUPPLY-LINE VOLTAGE**

**L.I. Tsytoovich**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, [tsli@susu.ac.ru](mailto:tsli@susu.ac.ru)

**M.M. Dudkin**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
[dudkinmax@mail.ru](mailto:dudkinmax@mail.ru)

**O.G. Brylina**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, [teolge@mail.ru](mailto:teolge@mail.ru)

**A.V. Tyugaev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
[atuugaev@gmail.com](mailto:atuugaev@gmail.com)

The integrating locker (L) with pseudo-following by fixing of natural switching points of supply-line voltage is considered. The device is intended for valve inverters working in conditions of a high level of external noises and switching distortions of supply-line voltage.

The simulation of L is carried out and the recommendations at the choice of a relation of own auto-oscillations frequency of a sweep converter and frequency of supply-line voltage are obtained. It is shown, the locker has a high noise stability on the part of the synchronizing channel as well as property of adapting to oscillations of amplitude supply-line voltage. The reasons are explained on which the given type of L is not recommended to be used in control systems with power supply from autonomous sources where «downwards» of supply-line voltage can be accompanied by instability of its frequency. The practical recommendations at the choice of parameters of L and rational areas of its application are given.

*Keywords:* locker, valve inverter, sweep converter, integrator, element relay.

### References

1. Osipov O.I. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie avtomatizirovannogo elektroprivoda postoyannogo toka: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Engineering Diagnosing of Automated Direct-Current Drive: Thesis for a Doctor's Degree], Chelyabinsk, 1995, 405 p.
2. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N. Bychkov A.E., Kashaev D.I., Moskov T.T. Energy saving in Electric Forced-Draft Mechanisms Multiply Objects, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2011, no.15 (232), pp. 40–45.
3. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N., Bychkov A.E., Belousov E.V. The Development of Methods for the Synthesis of Frequency Drives with Synchronous Electrical Machines, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2011, no. 34 (251), pp. 21–27.
4. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N. The Valve Drive with Field Regulated Reluctance Machine, *Russian Electrical Engineering*, 2013, № 3, pp. 37–43.
5. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N. Lokhov S.P., Belousov E.V. Electric Drives with Field Regulated Reluctance Machine for Cold Rolling Mills, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2012, no.16 (275), pp. 107–110.
6. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N., Gladyshev S.P., Gorozhankina A.N. Synthesis of Electric Drive Control System with Field Regulated Reluctance Machine, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2012, no. 37 (296), pp. 38–41.
7. Usynin Y.S. Grigoryev M.A., Shishkov A.N., Zhuravlev A.M., Lokhov S.P. Parametric Optimization of Variable Frequency Drives, *Bulletin of the South Ural State University. Series of «Power Engineering»*, 2012, no.37 (296), pp. 30–33.
8. Chernov E.A., Kuzmin V.P. *Komplektnye elektroprivody c ChPU: spravocnoe posobie* [Electric Drives Engineering Package of NC Machine Tools: Manual of Information], Gorkiy, 1989, 320 p.
9. Dudkin M.M., Tsytoovich L.I. *Elementy informatsionnoy elektroniki sistem upravleniya ventilyami preobrazovatelyami: monografiya* [Elements of Informational Electronics of Control Systems of the Valve Converters: Monograph], Chelyabinsk, 2011, 362 p.
10. Tsytoovich L.I., Rakhmatulin R.M., Dudkin M.M., Kachalov A.V. Reverse Thyristor Converter for Control Systems with an Electrical Mains Supply with Non-stationary Parameters, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2009, no. 4 (34), pp. 35–41.
11. Kachalov A.V., Tsytoovich L.I., Dudkin M.M. Integrating Lockers for Pulse-Phase Control Systems of Valve Converters, *Prakticheskaya silovaya elektronika [Practical Power Electronics]*, 2010, no.1 (37), pp. 42–51.
12. Tsytoovich L.I., Kachalov A.V., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. Adaptive System of Synchronization by Three-Phase Bridge Reverse Thyristor Converter, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2009, no.15 (148), pp. 45–50.
13. Dudkin M.M. Energy-Efficient Technologies in Test Beds with Application of Single-Phase Reversible Converters, *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2013, no.1 (13), pp. 5–18.
14. Tsytoovich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M. Adaptive Interval-Code Binary-Decimal Integrating Synchronization of Control Systems of Power Valve Converters, *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 3, pp. 8–15.
15. Tsytoovich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Rakhmatulin R.M. Adaptive Locker [Adaptivnoe ustroystvo sinkhronizatsii], patent 2400910 Russian Federation. decl. 09.04.09, publ. 27.09.10, bul. no.27.
16. Tsytoovich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V. Integrating Locker [Integriruyushchee ustroystvo sinkhronizatsii], patent 2422974 Russian Federation. decl. 17.12.09, publ. 27.06.11, bul. no.18.
17. Tsytoovich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Brylina O.G., Rakhmatulin R.M. Locker [Ustroystvo sinkhronizatsii], patent 2461948 Russian Federation. decl. 29.04.11, publ. 20.09.12, bul. no.26.
18. Tsytoovich L.I., Dudkin M.M., Brylina O.G., Rakhmatulin R.M. Locker [Ustroystvo sinkhronizatsii], patent 2465709 Russian Federation. decl. 12.10.11, publ. 27.10.12, bul. no.30.
19. Tsytoovich L.I., Brylina O.G., Kachalov A.V., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., Mufteev I.R. Integrating Locker [Integriruyushchee ustroystvo sinkhronizatsii], patent 2449456 Russian Federation. decl. 09.03.11, publ. 27.04.12, bul. no. 12.



20. Brylina O.G., Tsytoovich L.I., Dudkin M.M. Multi-Zone Frequency-Pulse-Width Regulator Alternating Voltage, *Energobezopasnost I energosberezhenie [Energy-Safety and Energy-saving]*, 2011, no. 6 (42), pp. 35–39.
21. Tsytoovich L.I. Sweep Operational Amplifier with Tunable Band Pass, *Instruments and Experimental Techniques*, 1979, no. 4, pp. 149–152.
22. Tsytoovich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Tereshchina O.G., Loginova N.A. Integrating Sweep Converters with Heightened Temperature Stability of Performances, *Pribory i sistemy. Ypravlenie, control, diagnostika [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics]*, 2010, no. 10, pp. 38–43.
23. Temnikov F.E., Slavinskii V.E. *Matematicheskie razvertyvayushchie sistemy* [Mathematical Sweep Systems], Moscow, 1970, 120 p.
24. Hyulsman L.P. *Aktivnye filtry* [Active Filters] / Ed. I.N. Teplyuka, Moscow, 1972, 561 p.
25. Tsytoovich L.I., Dudkin M.M., Kachalov A.V., Rakhmatulin R.M. Locker [Ustroystvo sinkhronizatsii], patent 2400911 Russian Federation. decl. 13.04.09, publ. 27.09.10, bul. no. 27.

*Поступила в редакцию 24.09.2013 г.*