



УДК 621.382

Сугаков В.Г., д.т.н., профессор ФБОУ ВПО «ВГУВТ»  
603950, г Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ФОРМЫ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

*Ключевые слова: пассивные и активные фильтры, несинусоидальность кривой напряжения, вольтодобавка, цифровая коррекция напряжения.*

*В докладе рассматриваются вопросы непосредственного изменения формы кривой напряжения, например, исправления несинусоидальности кривой напряжения в условиях нестабильности частоты автономных источников электрической энергии. Предлагается преобразователь формы кривой напряжения и приводится описание его работы.*

Обычно для изменения формы кривой напряжения используют схемы, содержащие пассивные и активные фильтры [1], подавляющие определенные гармонические составляющие и корректирующие форму кривой напряжения в сети до требуемого вида. В частности это происходит при исправлении несинусоидальности кривой напряжения генераторов переменного тока автономных источников электрической энергии, работающих на нелинейную нагрузку. Однако применение фильтров не всегда обеспечивает желаемую эффективность. Это обусловлено неидеальностью реальных фильтров, у которых частота среза не совпадает с частотой задерживания. Кроме того, повышенная нестабильностью частоты у автономных источников электрической энергии [2] изменяет спектральный состав напряжения, что также снижает эффективность фильтрации.

Путем непосредственного воздействия на форму напряжения, за счет вольтодобавки к мгновенному значению напряжения, возможно получение напряжения необходимой формы. Этот способ цифровой коррекции напряжения используется в преобразователе формы кривой напряжения [3], схема которого приведена на рис. 1.

Рассмотрим работу схемы при исправлении несинусоидальности кривой напряжения. При появлении положительной полуволны напряжения  $u(t)$  (рис. 2) на нагрузке 31 она проходит через выпрямитель 2 и поступает на вход ограничителя-формирователя 4. На выходе ограничителя-формирователя 4 появляется прямоугольный импульс, длительность которого равна полупериоду напряжения  $u(t)$  на нагрузке 31 и напряжения  $u_C(t)$  на шинах источника 32. По фронту этого импульса формирователь 7 выдает короткий импульс, который проходит через логический элемент ИЛИ 11 и элемент задержки 13. Импульсом с выхода элемента задержки 13 обнуляются регистр памяти 16 и счетчик 18, подготавливая схему к измерению амплитуды и полупериода напряжения источника  $u(t)$ .

Одновременно напряжение  $u(t)$  с нагрузки 31 поступает на вход второго выпрямителя 3 и на его выходе появляется пульсирующее напряжение  $|u(t)|$ . Из его состава исключаются высшие гармонические составляющие фильтром 5 и на вход первого АЦП 6 поступает гладкая положительная полуволна напряжения  $u(t)$ . На выходе АЦП 6

появляется код  $K_U$  мгновенного напряжения  $u(t)$ , который поступает на первый вход компаратора 17, и связан с напряжением  $u(t)$  выражением

$$K_U = u(t)/\Delta U_6, \quad (1)$$

где  $\Delta U_6$  – шаг квантования АЦП 6 и 36.

Так как на втором входе компаратора 17 присутствует нулевой код, поступивший с выхода регистра 16, то появляется сигнал на выходе БОЛЬШЕ компаратора 17, который поступает на вход формирователя 9. С выхода формирователя 9 короткий импульс поступает на вход записи регистра 16, в который записывается код мгновенного значения напряжения  $u(t)$ . По мере возрастания напряжения  $u(t)$  увеличивается код  $K_U$  на выходе АЦП 6 и на первом входе компаратора 17.

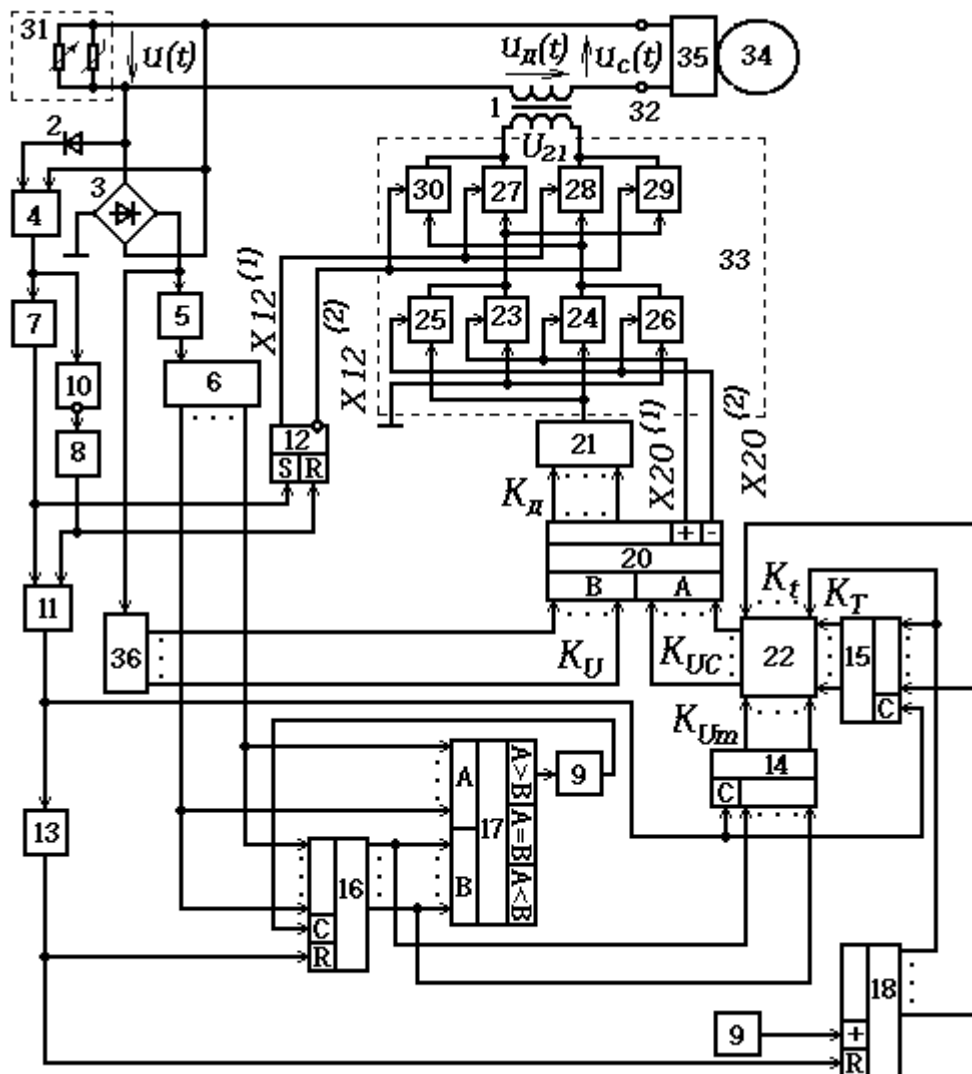


Рис. 1. Схема преобразователя формы кривой напряжения:

1 – вольтодобавочный трансформатор; 2 – выпрямитель однофазный однополупериодный; 3 – выпрямитель однофазный мостовой; 4 – формирователь-ограничитель; 5 – фильтр низких частот; 6 и 36 – аналого-цифровые преобразователи (АЦП); 7, 8 и 9 – формирователи коротких импульсов; 10 – логический элемент НЕ; 11 – логический элемент ИЛИ; 12 – RS-триггер; 13 – элемент задержки; 14, 15 и 16 – регистры памяти; 17 – числовой компаратор; 18 – суммирующий счетчик; 19 – генератор стабильных импульсов; 20 – вычитатель; 21 – цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП); 22 – трехмерный блок памяти; 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 и 30 – электронные ключи; 31 – нагрузка; 32 – шины источника; 33 – коммутатор; 34 – генератор переменного тока; 35 – система регулирования возбуждения генератора

Код на первом входе компаратора 17 становится больше кода на его втором входе. Вновь появляется сигнал на выходе БОЛЬШЕ компаратора 17 и импульсом с выхода

формирователя 9 в регистр 16 записывается очередной код мгновенного значения напряжения  $u(t)$ .

Этот процесс перезаписи кода мгновенного значения напряжения  $u(t)$  происходит до момента записи в регистр 16 кода  $K_{Um}$  амплитудного значения напряжения  $u(t)$ .

Сформированный код  $K_{Um}$  амплитудного значения напряжения  $u(t)$ , поступает на разряды информационного входа регистра 14 и связан с амплитудой  $U_m$  напряжения  $u(t)$  выражением

$$K_{Um} = U_m / \Delta U_6. \quad (2)$$

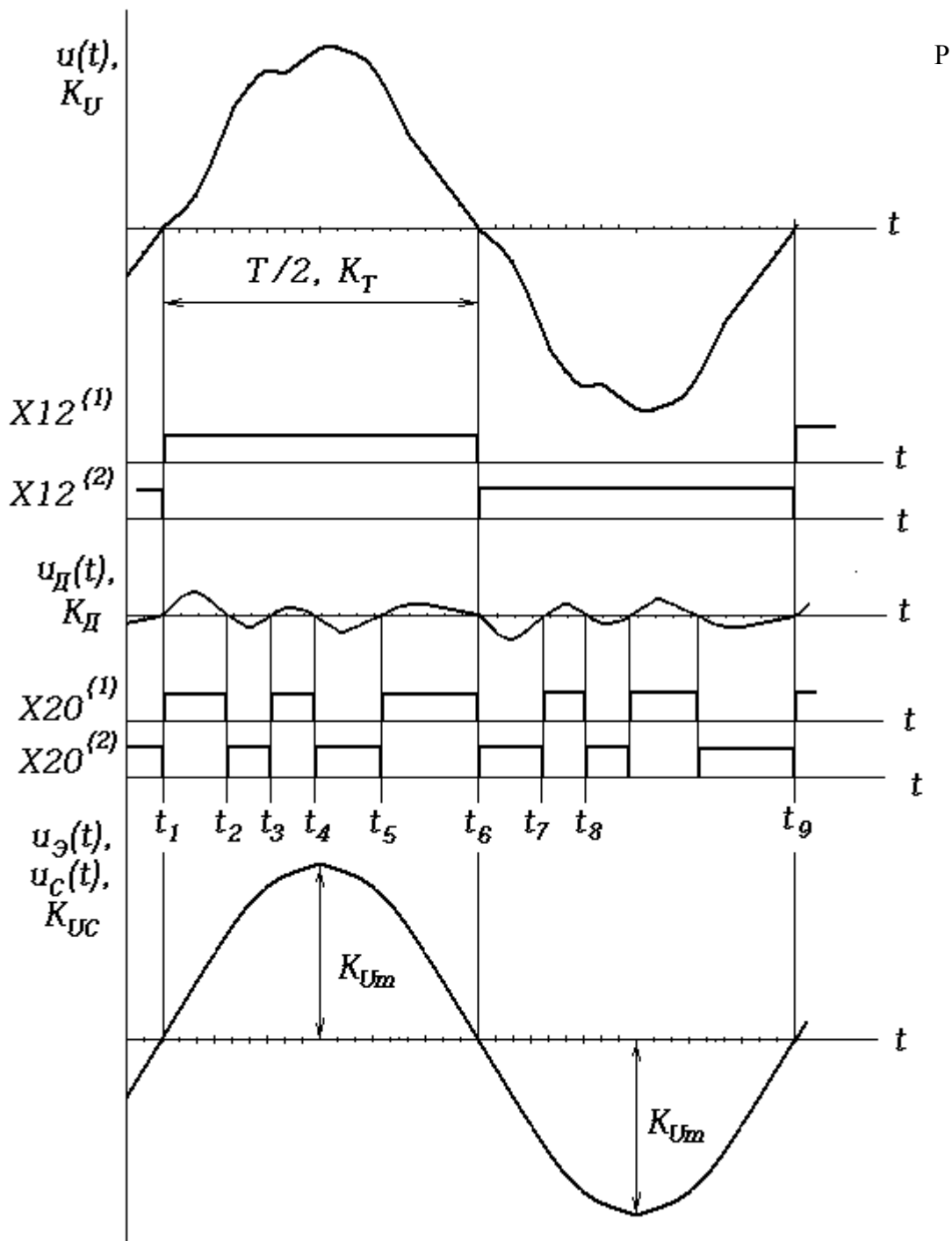


Рис. 2. Эпюры сигналов на основных элементах преобразователя формы кривой напряжения

Одновременно с появлением положительной полуволны напряжения  $u(t)$  после обнуления счетчика 18, он начинает подсчет числа импульсов стабильной частоты, поступающих с выхода генератора 19. На выходе счетчика 18 формируется код  $K_T$  полупериода напряжения  $u(t)$ , который связан с периодом  $T$  напряжения  $u(t)$  выражением

$$T = 2 T_{\text{Э}} \cdot K_T, \quad (3)$$

где  $T_{\text{Э}}$  – период следования стабильных импульсов с выхода генератора 19.

По окончании положительной полуволны и приходом отрицательной полуволны напряжения  $u(t)$  исчезает сигнал на выходе формирователя 4 и появляется сигнал на выходе логического элемента НЕ 10. По фронту этого сигнала появляется короткий импульс на выходе формирователя 8. Этот импульс проходит через логический элемент ИЛИ 11 и поступает на входы записи регистров памяти 14 и 15. При этом в регистр 14 записывается код  $K_{Um}$  амплитудного значения, а в регистр с выхода счетчика 15 код  $K_T$  полупериода напряжения  $u(t)$  18, поступающие соответственно на первый и второй входы адреса блока памяти 22. После записи кодов амплитуды и полупериода в регистры 14 и 15, регистр 15 и счетчик 18 обнуляются импульсом с выхода элемента задержки 13 и начинается процесс формирования очередных кодов амплитуды и полупериода. Вместе с тем по ранее полученным кодам осуществляется коррекция кривой напряжения, для чего на третий вход адреса блока памяти 22 с выхода счетчика 18 подается возрастающий код  $K_t$  текущего времени  $t$ , которое связано с кодом выражением

$$t = T_{\text{Э}} \cdot K_t. \quad (4)$$

В ячейках блока памяти 22 записаны коды  $K_{UC}$  мгновенных значений эталонного напряжения  $u_{\text{Э}}(t)$  с идеально синусоидальной формой, которые связаны выражением

$$K_{UC} = u_{\text{Э}}(t) / \Delta U_6, \quad (5)$$

где 
$$u_{\text{Э}}(t) = U_m \sin(2\pi t / T). \quad (6)$$

В зависимости от текущего времени, амплитуды и периода напряжения  $u(t)$  на выходе блока памяти 22 появляется соответствующий код  $K_{UC}$  эталонного напряжения, который поступает на вход уменьшаемого вычитателя 20. На его входе вычитаемого присутствует код  $K_U$  текущего напряжения на нагрузке, который формируется на выходе второго АЦП 36 связан с напряжением  $u(t)$  выражением (1). На выходе вычитателя 20 появляется код  $K_D$  разности или отклонения мгновенного значения напряжения нагрузки от эталонного напряжения

$$K_D = |K_{UC} - K_U|. \quad (7)$$

Этот код  $K_D$  поступает на вход ЦАП 21, и на его выходе появляется напряжение

$$U_{21} = K_D \cdot \Delta U_{21}, \quad (8)$$

где  $\Delta U_{21}$  – шаг квантования ЦАП 21

$$\Delta U_{21} = K_{ВД} \cdot \Delta U_6; \quad (9)$$

$K_{ВД}$  – коэффициент трансформации вольтодобавочного трансформатора 1

$$K_{ВД} = U_{21} / U_D; \quad (10)$$

$U_D$  – напряжение на вторичной обмотке трансформатора 1.

Мгновенное значение напряжения  $u_{21}(t)$  с выхода ЦАП 21, поступает на коммутатор 33, построенный на электронных ключах 23...30, который задает направление коррекции напряжения, путем изменения полярности напряжения  $u_{21}(t)$ , следующим образом.

Если напряжение  $u(t)$  имеет положительные мгновенные значения (положительная полуволна) и они меньше мгновенных значений эталонного напряжения  $u_{\text{Э}}(t)$  (интервал времени  $t_1 - t_2$ , рис. 2), то появляется сигнал  $X12^{(1)}$  на прямом выходе триггера 12, который поступает на управляющие электроды ключей 27 и 28, открывая их. Поскольку при превышении эталонного напряжения  $u_{\text{Э}}(t)$  над напряжением нагрузки  $u(t)$  разность кодов на выходе вычитателя 20 положительна, то присутствует сигнал  $X20^{(1)}$  на прямом выходе признака знака вычитателя 20, который поступает на управляющие электроды ключей 23 и 24, открывая их. Через открытые ключи 23, 24, 27 и 28 к первичной обмотке трансформатора 1 подается напряжение с выхода ЦАП 21 в прямой полярности. В результате на вторичной обмотке трансформатора 1 появляется напряжение  $u_D(t)$ ,

которое складывается с напряжением на нагрузке  $u(t)$ , и мгновенное значение сетевого напряжения  $u_C(t)$  возрастает приближаясь к эталонному напряжению  $u_Э(t)$ . Аналогично протекает процесс на интервалах времени  $t_3 - t_4$  и  $t_5 - t_6$  (рис. 2).

Если при положительных мгновенных значениях напряжения  $u(t)$ , оно оказывается больше мгновенных значений эталонного напряжения  $u_Э(t)$  (интервал времени  $t_2 - t_3$ , рис. 2), то электронные ключи 27 и 28 остаются открытыми за счет сигнала  $X12^{(1)}$  с прямого выхода триггера 12. Однако код разности мгновенных значений напряжений  $u(t)$  и  $u_Э(t)$  на выходе вычитателя 20 приобретает отрицательное значение и появляется сигнал  $X20^{(2)}$  на инверсном выходе признака знака вычитателя 20, который поступает на управляющие электроды ключей 25 и 26, открывая их. Одновременно оказываются открытыми электронные ключи 25, 26, 27 и 28 через которые на первичную обмотку трансформатора 1 подается напряжение с выхода ЦАП 21 с обратной полярностью. На вторичной обмотке трансформатора 1 появляется напряжение  $u_D(t)$ , которое вычитается из напряжения  $u(t)$ , поддерживая мгновенное значение сетевого напряжения  $u_C(t)$  на уровне эталонного  $u_Э(t)$  напряжения.

Если напряжение  $u(t)$  имеет отрицательные мгновенные значения (отрицательная полуволна, интервал времени  $t_6 - t_9$ , рис. 2), то появляется сигнал  $X12^{(2)}$  на инверсном выходе триггера 12, который поступает на управляющие электроды электронных ключей 29 и 30 и открывает их. При отклонении мгновенного значения напряжения  $u(t)$  в меньшую сторону (интервал времени  $t_6 - t_7$ , рис. 2) относительно эталонного напряжения  $u(t)$  код  $K_{UC}$  на первом входе вычитателя 20 больше кода  $K_U$  на его втором входе, поэтому присутствует сигнал  $X20^{(1)}$  на прямом выходе признака знака вычитателя 20, которым открываются электронные ключи 23 и 24. Через открытые ключи 23, 24, 29 и 30 напряжение с выхода ЦАП 21 поступает на первичную обмотку трансформатора 1. При этом на вторичной обмотке трансформатора 1 появляется напряжение  $u_D(t)$ , совпадающее по фазе с напряжением  $u(t)$ , что приводит к коррекции кривой напряжения  $u_C(t)$  в нужном направлении.

Если при отрицательных мгновенных значениях напряжения  $u(t)$  оно отклоняется в большую сторону от эталонного (интервал времени  $t_7 - t_8$ , рис. 2), то открываются ключи 25, 26, 29 и 30, которые обеспечивают уменьшение (по абсолютной величине) мгновенных значений напряжения  $u_C(t)$  до эталонного напряжения.

Таким образом в любой момент времени на вторичной обмотке трансформатора 1 появляется напряжение  $u_D(t)$ , которое корректирует мгновенное значение напряжения сети  $u_C(t)$  приближая его форму к идеальной синусоиде  $u_Э(t)$

$$u(t) + u_D(t) = u_C(t) = u_Э(t).$$

Погрешность коррекции кривой напряжения зависит от разрядности  $N$  цифровых элементов входящих в схему устройства. При  $N=10$  погрешность не превышает 0,001.

Для получения другой формы знакопеременного напряжения (прямоугольного, пилообразного и т.д.) в блок памяти 22 необходимо записать коды соответствующих мгновенных значений напряжения.

### Список литературы:

- [1] Лачин В.И. Электроника : учеб. пособие / В.И. Лачин, Н.С. Савёлов. – Изд. 7-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2009. – с. 267-287.
- [2] Сугаков В.Г. Системы автоматического регулирования параметров электрической энергии судовых электростанций. Ч. 2. Автоматическое регулирование напряжения судовых источников электрической энергии : учеб. пособие / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов. – Н. Новгород : Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2011. 180 с.
- [3] Патент на изобретение № 25233005 по заявке 2013108756 от 27.02.2013, кл. H02P 9/14.

### FORMS CONVERTER VOLTAGE CURVES

*Keywords:* passive and active filters, nonsinusoidality curve-voltage, voltage boost, a digital voltage correction.

*The report deals with the immediate change in the shape of the curve on-voltage, for example, fix non-sinusoidal voltage waveform in a frequency instability of autonomous sources of electric energy. Offers Xia drive voltage wav*