

## А. С. Куликов

### 150°-ный угол коммутации в трёхфазных инверторах по схеме Ларионова

В 3-х фазном инверторе по схеме Ларионова с включением нагрузки звездой, обычно применяют 180°-ный или 120°-ный углы коммутации [1, Стр.99, Рис. 3-5.], при которых используются только по 6 из всех 12-ти «легальных» возможных состояний в инверторе. Коммутационная последовательность со 180°-ным углом коммутации использует одну половину из 12-ти «легальных» возможных состояний, а со 120°-ным углом коммутации использует другую половину из 12-ти «легальных» возможных состояний в инверторе.

В настоящей работе предлагаются:

1. 150°-ный, а не 180°-ный или 120°-ный, угол коммутации в 3-х фазном инверторе по схеме Ларионова,
2. нумерация в инверторе не только ключей, но и каскадов-фаз,
3. адресная, а не последовательностная, нумерация каскадов-фаз и ключей в инверторе по схеме Ларионова,
4. цифровые описания коммутационных последовательностей,
5. коммутационные последовательности со 150°-ным углом коммутации с полным использованием всех 12-ти «легальных» возможных состояний в инверторе по схеме Ларионова,
6. модель устройства управления 3-х фазным инвертором по схеме Ларионова со 150°-ным углом коммутации в симуляторе электронных схем Circuit Simulator v1.6a.

Для определения всей коммутационной последовательности, но не конкретного состояния в последовательности, необходимо задать угол начала открытого состояния одного ключа инвертора от начала первого полупериода -  $\alpha$ . Из-за симметричности синусоиды угол закрытия ключа равен  $180^\circ - \alpha$ . Углы второго ключа каскада-фазы сдвинуты относительно углов первого ключа каскада-фазы на  $180^\circ$ . Углы двух других каскадов-фаз сдвинуты относительно углов первого каскада-фазы на  $120^\circ$  и  $240^\circ$  соответственно. Таким образом, вся коммутационная последовательность, но не каждые отдельные состояния в последовательности, полностью определяется одним углом  $\alpha$  или одним углом открытого состояния одного ключа (углом коммутации) -  $\beta = 180^\circ - 2\alpha$ . При  $180^\circ$ -ном угле коммутации угол  $\alpha = (180^\circ - \beta) / 2 = (180^\circ - 180^\circ) / 2 = 0^\circ$ . При  $150^\circ$ -ном угле коммутации угол  $\alpha = (180^\circ - \beta) / 2 = (180^\circ - 150^\circ) / 2 = 15^\circ$ . При  $120^\circ$ -ном угле коммутации угол  $\alpha = (180^\circ - \beta) / 2 = (180^\circ - 120^\circ) / 2 = 30^\circ$ .

Нумерация каскадов-фаз инвертора и адресная нумерация ключей в инверторе.

В работе [1], в инверторе по схеме Ларионова, нумеруются только отдельные ключи (1, 2, 3, 4, 5, 6), каскады-фазы инвертора не нумеруются. В данной работе нумеруются и каскады-фазы инвертора (С1, С2, С3) и ключи инвертора (10, 12, 20, 22, 30, 32) (Рис. 1).

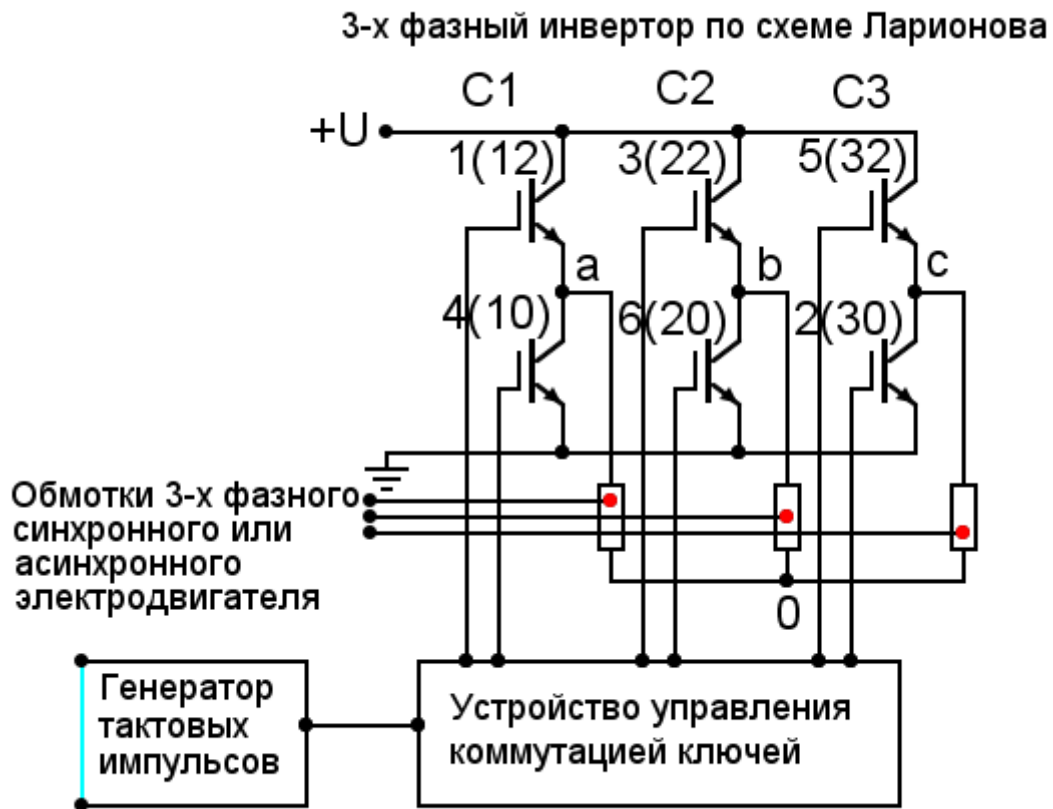


Рис. 1. Нумерация каскадов (C1, C2, C3) в инверторе по схеме Ларионова и ключей в каскадах-фазах инвертора.

В данной работе, нумерация ключей не связана с последовательностью открывания ключей, а связана с адресом ключа (номером каскада-фазы и с положением ключа в каскаде-фазе) (например, в первом каскаде-фазе инвертора по схеме Ларионова (Рис. 1): 10 — первый каскад-фаза, нижний ключ, код 11 зарезервирован для третьего среднего ключа первого каскада-фазы, 12 — первый каскад-фаза, верхний ключ).

Цифровые описания состояния ключей в инверторе по схеме Ларионова.

Каждый каскад-фаза 3-х фазного инвертора по схеме Ларионова имеет четыре возможных состояния, которые описываются четырьмя кодами. В двоичной системе счисления двоичными кодами:  $00_2$ ,  $01_2$ ,  $10_2$  и  $11_2$ , в четверичной системе счисления кодами:  $0_4$ ,  $1_4$ ,  $2_4$ ,  $3_4$ , в десятичной системе счисления кодами:  $0_{10}$ ,  $1_{10}$ ,  $2_{10}$ ,  $3_{10}$ , в шестнадцатичной системе счисления кодами:  $0_{16}$ ,  $1_{16}$ ,  $2_{16}$ ,  $3_{16}$ . Четвёртое состояние с обоими открытыми ключами (с кодом  $11_2 = 3_4 = 3_{10} = 3_{16}$ ) является коротким замыканием и, поэтому, в нормальном режиме работы инвертора, не используется, но состояние  $11_2$  возможно при сбоях и неисправностях. Для состояний, используемых только в нормальном режиме, возможно неполное описание в троичной системе счисления:  $\{00_2, 01_2, 10_2\} = \{0_3, 1_3, 2_3\}$ , но при этом не описывается одно из важнейших состояний каскада инвертора — состояние короткого замыкания —  $11_2$ .

Три каскада инвертора по схеме Ларионова имеют  $4^3 = 64$  возможных

состояния, из которых 37 являются короткими замыканиями, 8 из 37-ми являются двойными короткими замыканиями, а 1 из 37-ми является тройным коротким замыканием.

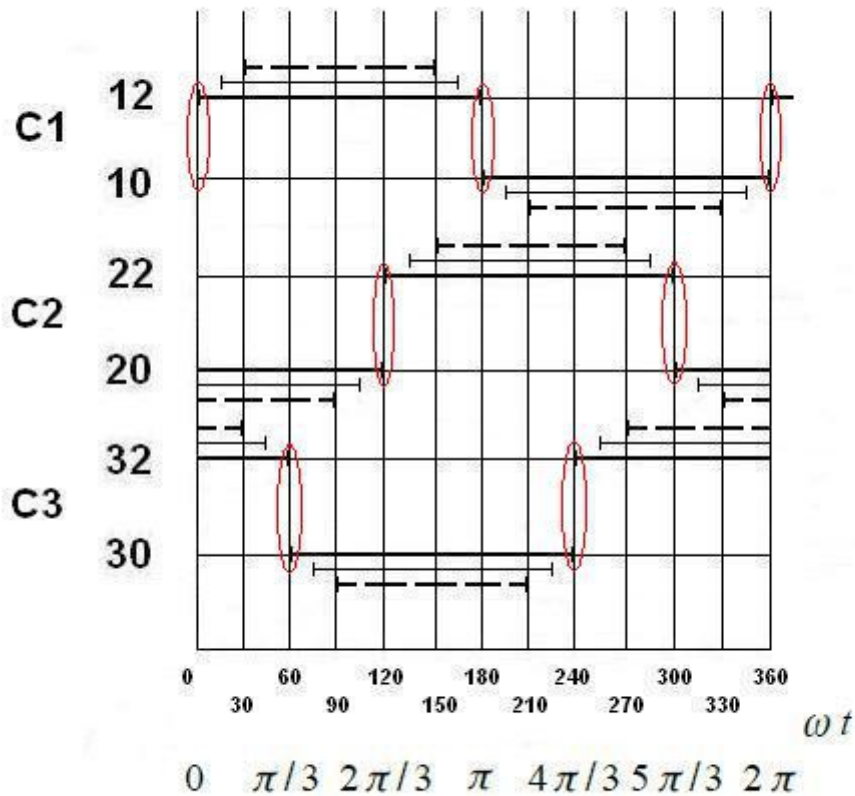


Рис. 2. Графики коммутационных последовательностей со 180°-ным (сплошная толстая), 150°-ным (сплошная тонкая) и 120°-ным (пунктирная толстая) углом коммутации (в овалах переключения при 180°-ном угле коммутации с большой вероятностью возникновения «сквозных токов» короткого замыкания).

Из-за дополнительных условий:

1. углы второго полуцикла сдвинуты на 180°,
  2. сдвиг фаз между каскадами-фазами инвертора должен быть равен 120°,
- в 3-х фазных инверторах используются только 12 из 27-ми оставшихся возможных состояний.

При 180°-ном угле коммутации, из-за шумовых сдвигов в схеме управления, в каскадах инвертора, при переключениях, имеется большая вероятность возникновения «сквозных токов» короткого замыкания (Рис. 2), из-за которых и горят ключи в инверторах со 180°-ным углом коммутации.

При 120°-ном угле коммутации в фазных напряжениях всего три уровня напряжения (Рис. 4.), фазные напряжения прямоугольные, крутящий момент двигателя изменяется резкими скачками, что приводит к низкому качеству производимой производством продукции и к преждевременному износу

подшипников двигателя и приводимого двигателем оборудования.

Мгновенная мощность в нагрузке 3-х фазного переменного тока постоянна только при 3-х фазном напряжении синусоидальной формы. Приближение формы фазных напряжений к синусоидальной, при  $150^\circ$ -ном угле коммутации, приближает мгновенное значение вектора крутящего момента электродвигателя к постоянному, повышает качество производимой производством продукции и уменьшает преждевременный износ подшипников электродвигателя и приводимого электродвигателем оборудования.

Возможно множество коммутационных последовательностей со  $180^\circ$ -ным углом коммутации: 6-ти шаговая с шагом  $60^\circ$ , 12-ти шаговая с шагом  $30^\circ$  и т. д..

6-ти шаговая (шаг= $360^\circ/6=60^\circ$ ) коммутационная последовательность со  $180^\circ$ -ным углом коммутации (3 шага по  $60^\circ$ ):

S3C2C1

$$100110_2 = 212_3 = 212_4 = 23_{3,10} = 38_{4,10} = 26_{16} = W_{27}$$

$$010110_2 = 112_3 = 112_4 = 14_{3,10} = 22_{4,10} = 16_{16} = N_{27}$$

$$011010_2 = 122_3 = 122_4 = 17_{3,10} = 28_{4,10} = 10_{16} = Q_{27}$$

$$011001_2 = 121_3 = 121_4 = 16_{3,10} = 27_{4,10} = 19_{16} = P_{27}$$

$$101001_2 = 221_3 = 221_4 = 25_{3,10} = 41_{4,10} = 29_{16} = Y_{27}$$

$$100101_2 = 211_3 = 211_4 = 22_{3,10} = 37_{4,10} = 25_{16} = V_{27}$$

100110 010110 011010 011001 101001 100101... в двоичной системе счисления,

212 112 122 121 221 211... в троичной несимметричной системе счисления,

212 112 122 121 221 211... в четверичной системе счисления,

23 14 17 16 25 22... десятичные коды чисел в троичной системе счисления,

38 22 28 27 41 37... десятичные коды чисел в четверичной системе счисления,

26 16 10 19 29 25... в шестнадцатеричной системе счисления,

WNQPYV... в двадцатисемиричной несимметричной системе счисления.

12-ти шаговая коммутационная последовательность со  $180^\circ$ -ным углом коммутации (6 шагов по  $30^\circ$ ):

S3C2C1

$$100110_2 = 212_3 = 212_4 = 23_{3,10} = 38_{4,10} = 26_{16} = W_{27}$$

$$100110_2 = 212_3 = 212_4 = 23_{3,10} = 38_{4,10} = 26_{16} = W_{27}$$

$$010110_2 = 112_3 = 112_4 = 14_{3,10} = 22_{4,10} = 16_{16} = N_{27}$$

$$010110_2 = 112_3 = 112_4 = 14_{3,10} = 22_{4,10} = 16_{16} = N_{27}$$

$$011010_2 = 122_3 = 122_4 = 17_{3,10} = 26_{4,10} = 10_{16} = Q_{27}$$

$$011010_2 = 122_3 = 122_4 = 17_{3,10} = 26_{4,10} = 10_{16} = Q_{27}$$

$$011001_2 = 121_3 = 121_4 = 16_{3,10} = 25_{4,10} = 19_{16} = P_{27}$$

$$011001_2 = 121_3 = 121_4 = 16_{3,10} = 25_{4,10} = 19_{16} = P_{27}$$

$$101001_2 = 221_3 = 221_4 = 25_{3,10} = 41_{4,10} = 29_{16} = Y_{27}$$

$$101001_2 = 221_3 = 221_4 = 25_{3,10} = 41_{4,10} = 29_{16} = Y_{27}$$

$$100101_2 = 211_3 = 211_4 = 22_{3,10} = 37_{4,10} = 25_{16} = V_{27}$$

$$100101_2 = 211_3 = 211_4 = 22_{3,10} = 37_{4,10} = 25_{16} = V_{27}$$

100110 100110 010110 010110 011010 011010 011001 011001 101001 101001

100101 100101...

212 212 112 112 122 122 121 121 221 221 211 211...

212 212 112 112 122 122 121 121 221 221 211 211...  
 23 23 14 14 17 17 16 16 25 25 22 22...  
 38 38 22 22 26 26 25 25 41 41 37 37...  
 26 26 16 16 10 10 19 19 29 29 25 25...  
 WWNNQPPYYVV..

Возможно множество коммутационных последовательностей со  $120^\circ$ -ным углом коммутации: 6-ти шаговая с шагом  $60^\circ$ , 12-ти шаговая с шагом  $30^\circ$  и т. д..

6-ти шаговая (шаг= $360^\circ/6=60^\circ$ ) коммутационная последовательность со  $120^\circ$ -ным углом коммутации (два шага по  $60^\circ$ ):

S3C2C1

$$000110_2 = 012_3 = 012_4 = 06_{3,10} = 06_{4,10} = 06_{16} = E_{27}$$

$$010010_2 = 102_3 = 102_4 = 11_{3,10} = 18_{4,10} = 12_{16} = K_{27}$$

$$011000_2 = 120_3 = 120_4 = 15_{3,10} = 24_{4,10} = 18_{16} = O_{27}$$

$$001001_2 = 021_3 = 021_4 = 07_{3,10} = 09_{4,10} = 09_{16} = G_{27}$$

$$100001_2 = 201_3 = 201_4 = 19_{3,10} = 33_{4,10} = 21_{16} = S_{27}$$

$$100100_2 = 210_3 = 210_4 = 21_{3,10} = 36_{4,10} = 24_{16} = U_{27}$$

000110 010010 011000 001001 100001 100100... в двоичной системе счисления,  
 012 102 120 021 201 210... в троичной несимметричной системе счисления,  
 012 102 120 021 201 210... в четверичной системе счисления,  
 06 11 15 07 19 21... десятичные коды чисел в троичной системе счисления,  
 06 18 24 09 33 36... десятичные коды чисел в четверичной системе счисления,  
 06 12 18 09 21 24... в шестнадцатиричной системе счисления,  
 EKOGSU... в двадцатисемиричной несимметричной системе счисления.

Эта же коммутационная последовательность описывается одним углом  $\alpha=30^\circ$  или одним углом коммутации  $\beta=120^\circ$ , но цифровые описания коммутационных последовательностей позволяют определить и всю коммутационную последовательность и каждое отдельное состояние в коммутационной последовательности.

12-ти шаговая (шаг= $360^\circ/12=30^\circ$ ) коммутационная последовательность со  $120^\circ$ -ным углом коммутации (4 шага по  $30^\circ$ ):

S3C2C1

$$000110_2 = 012_3 = 012_4 = 05_{3,10} = 06_{4,10} = 06_{16} = E_{27}$$

$$000110_2 = 012_3 = 012_4 = 05_{3,10} = 06_{4,10} = 06_{16} = E_{27}$$

$$010010_2 = 102_3 = 102_4 = 11_{3,10} = 18_{4,10} = 12_{16} = K_{27}$$

$$010010_2 = 102_3 = 102_4 = 11_{3,10} = 18_{4,10} = 12_{16} = K_{27}$$

$$011000_2 = 120_3 = 120_4 = 15_{3,10} = 24_{4,10} = 18_{16} = O_{27}$$

$$011000_2 = 120_3 = 120_4 = 15_{3,10} = 24_{4,10} = 18_{16} = O_{27}$$

$$001001_2 = 021_3 = 021_4 = 07_{3,10} = 09_{4,10} = 09_{16} = G_{27}$$

$$001001_2 = 021_3 = 021_4 = 07_{3,10} = 09_{4,10} = 09_{16} = G_{27}$$

$$100001_2 = 201_3 = 201_4 = 19_{3,10} = 33_{4,10} = 21_{16} = S_{27}$$

$$100001_2 = 201_3 = 201_4 = 19_{3,10} = 33_{4,10} = 21_{16} = S_{27}$$

$$100100_2 = 210_3 = 210_4 = 21_{3,10} = 36_{4,10} = 24_{16} = U_{27}$$

$$100100_2 = 210_3 = 210_4 = 21_{3,10} = 36_{4,10} = 24_{16} = U_{27}$$

000110 000110 010010 010010 011000 011000 001001 001001 100001 100001

100100 100100...  
 012 012 102 102 120 120 021 021 201 201 210 210...  
 012 012 102 102 120 120 021 021 201 201 210 210...  
 05 05 11 11 15 15 07 07 19 19 21 21...  
 06 06 18 18 24 24 09 09 33 33 36 36...  
 06 06 12 12 18 18 09 09 21 21 24 24...  
 EEKKOOGGSSUU...

Коммутационные последовательности со  $150^\circ$ -ным углом коммутации в инверторе по схеме Ларионова.

Возможно множество коммутационных последовательностей со  $150^\circ$ -ным углом коммутации: 12-ти шаговая с шагом  $30^\circ$ , 24-х шаговая с шагом  $15^\circ$  и т. д..

12-ти шаговая (шаг= $360^\circ/12=30^\circ$ ) коммутационная последовательность со  $360^\circ*5/12=150^\circ$ -ным углом коммутации (5 шагов по  $30^\circ$ ):

S3C2C1

$100110_2 = 212_3 = 212_4 = 23_{3,10} = 38_{4,10} = 26_{16} = W_{27}$   
 $000110_2 = 012_3 = 012_4 = 05_{3,10} = 06_{4,10} = 06_{16} = E_{27}$   
 $010110_2 = 112_3 = 112_4 = 14_{3,10} = 22_{4,10} = 16_{16} = N_{27}$   
 $010010_2 = 102_3 = 102_4 = 11_{3,10} = 18_{4,10} = 12_{16} = K_{27}$   
 $011010_2 = 122_3 = 122_4 = 17_{3,10} = 26_{4,10} = 10_{16} = Q_{27}$   
 $011000_2 = 120_3 = 120_4 = 15_{3,10} = 24_{4,10} = 18_{16} = O_{27}$   
 $011001_2 = 121_3 = 121_4 = 16_{3,10} = 25_{4,10} = 19_{16} = P_{27}$   
 $001001_2 = 021_3 = 021_4 = 07_{3,10} = 09_{4,10} = 09_{16} = G_{27}$   
 $101001_2 = 221_3 = 221_4 = 25_{3,10} = 41_{4,10} = 29_{16} = Y_{27}$   
 $100001_2 = 201_3 = 201_4 = 19_{3,10} = 33_{4,10} = 21_{16} = S_{27}$   
 $100101_2 = 211_3 = 211_4 = 22_{3,10} = 37_{4,10} = 25_{16} = V_{27}$   
 $100100_2 = 210_3 = 210_4 = 21_{3,10} = 36_{4,10} = 24_{16} = U_{27}$

100110 000110 010110 010010 011000 011001 001001 101001 100001 100101  
 100100...

212 012 112 102 122 120 121 021 221 201 211 210...  
 212 012 112 102 122 120 121 021 221 201 211 210...  
 23 05 14 11 17 15 16 07 25 19 22 21...  
 38 06 22 18 26 24 25 09 41 33 37 36...  
 26 06 16 12 10 18 19 09 29 21 25 24...  
 WENKQOPGYSVU...

Устройство управления ключами в инверторе по схеме Ларионова со  $150^\circ$ -ным углом коммутации и его модель в симуляторе электронных схем Circuit Simulator v1.6a.

Возможно большое множество схем устройств управления ключами в инверторе по схеме Ларионова со  $150^\circ$ -ным углом коммутации.

В инверторах с электроннологическим управлением устройство управления должно содержать генератор тактовых импульсов изменяемой частоты, счётчик на 12, дешифратор 1 из 12 и 6 шифраторов состояний ключей (модель №1) или генератор тактовых импульсов, 3 устройства управления каскадами с тремя

состояниями и распределитель тактовых импульсов (модель №2).

В приведённой на снимке (Рис. 3) модели №1 и счётчик на 12 и дешифратор 1 из 12 выполнены на кольцевом регистре сдвига на 12-ти JK-триггерах с двумя инверсиями в кольце.

В инверторах с программным управлением от микроконтроллера можно использовать шесть битов регистра выходного порта, в которые из выбранной коммутационной последовательности циклически последовательно перезаписываются коды состояний ключей в инверторе по схеме Ларионова.

Один шаг между закрытием одного ключа и открытием другого ключа в одном каскаде преобразователя защищает каскады от «сквозных токов» короткого замыкания из-за случайных шумовых сдвигов в схеме управления.

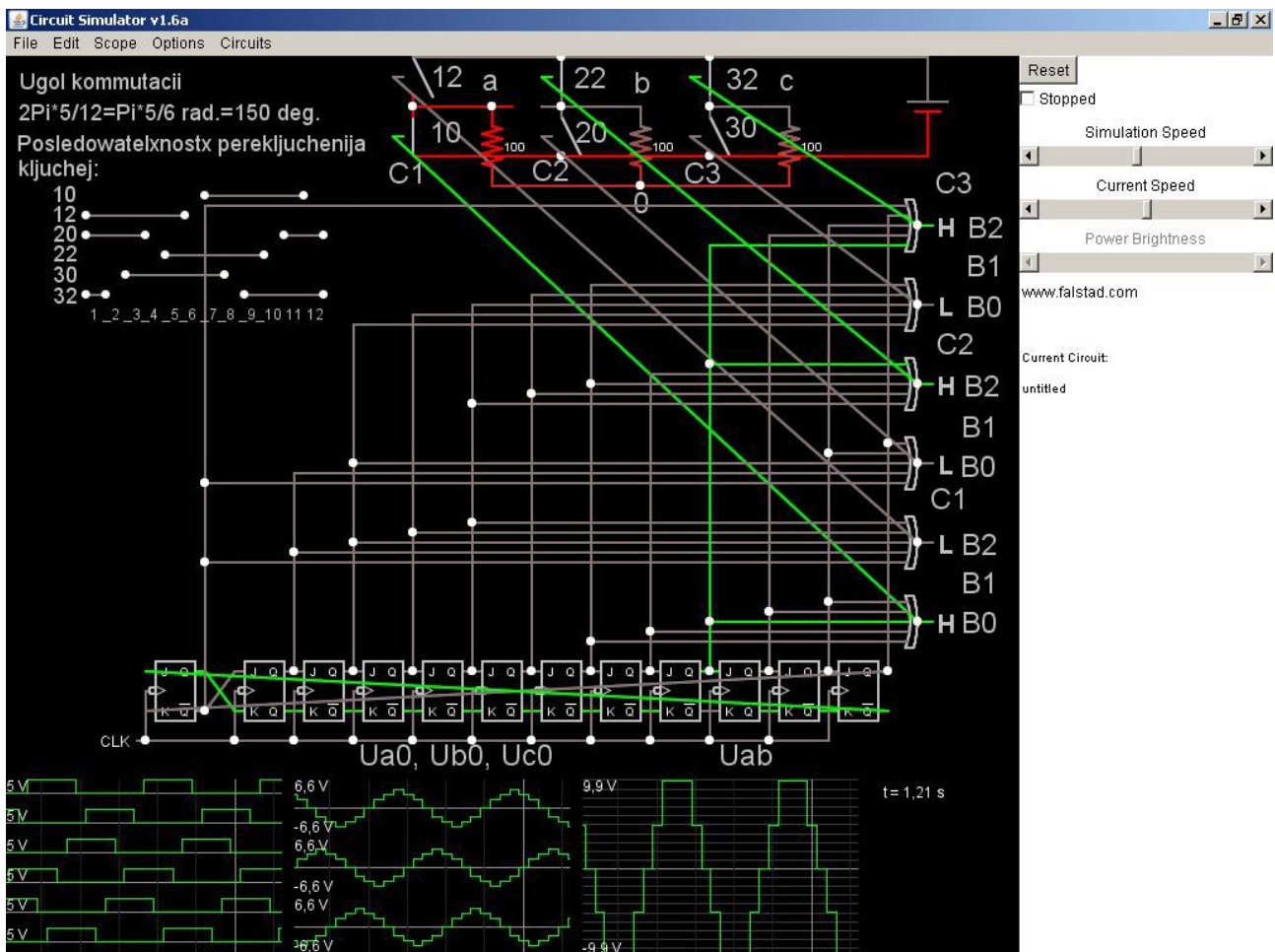


Рис. 3. Снимок с экрана модели №1 3-х фазного инвертора (преобразователя) по схеме Ларионова с включением нагрузки звездой со 150°-ным углом коммутации в симуляторе электронных схем Circuit Simulator v1.6a.

При 180°-ном и 150°-ном углах коммутации (Рис. 4) максимальная амплитуда фазных напряжений  $U_{a0}$ ,  $U_{b0}$  и  $U_{c0}$  в 1,33... раза больше, чем при 120°-ном угле коммутации и составляет  $(2/3)U_{\text{пит.}} \approx 0,66U_{\text{пит.}}$ .

При  $180^\circ$ -ном угле коммутации фазные напряжения имеют четыре ступени напряжения по амплитуде.

При  $120^\circ$ -ном угле коммутации фазные напряжения имеют три ступени напряжения по амплитуде.

При  $150^\circ$ -ном угле коммутации фазные напряжения на нагрузке (обычно на обмотках 3-х фазного электродвигателя) имеют не 4 или 3, а 7 (семь) уровней напряжений по амплитуде и более приближены к синусоиде, чем в коммутационных последовательностях со  $180^\circ$ -ным и  $120^\circ$ -ным углом коммутации.

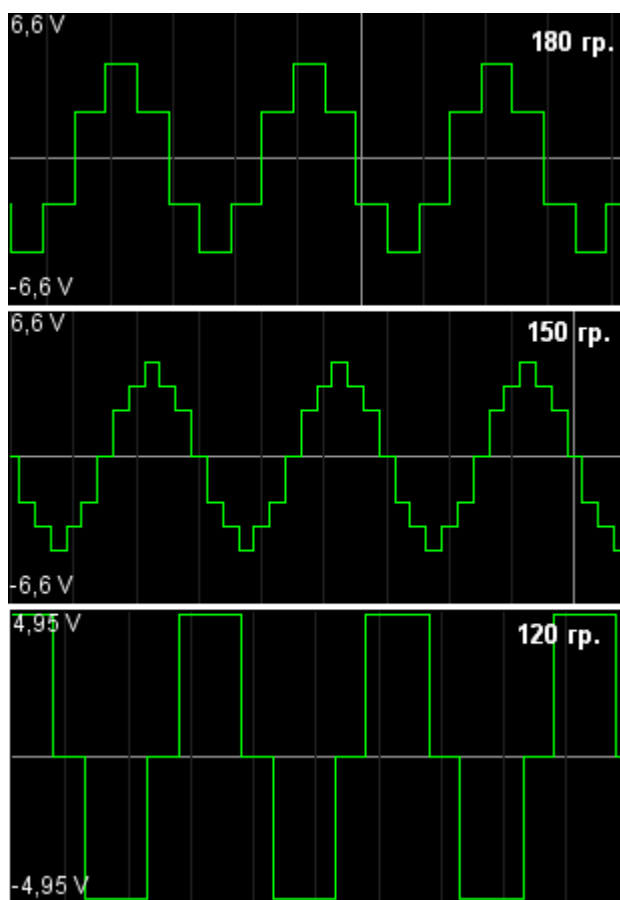


Рис. 4. Снимок графиков фазных напряжений  $U_{a0}$  в трёх моделях 3-х фазных инверторов по схеме Ларионова с углами коммутации  $180^\circ$ ,  $150^\circ$  и  $120^\circ$  в симуляторе электронных схем Circuit Simulator v1.6a.

В приведённой на снимке (Рис. 5.) модели №2 устройства управления каскадами с тремя состояниями выполнены на счётчиках-дешифраторах на 4 на кольцевых регистрах сдвига на 4-х JK-триггерах с двумя инверсиями в кольце. Распределитель тактовых импульсов выполнен на счётчике на 2 на D-триггере и счётчике-дешифраторе на 3 (троичном трёхбитном (3В ВСТ, «трёхпроводном») счётном триггере (Т-триггере)) на кольцевом регистре сдвига на 3-х JK-триггерах с двумя инверсиями в кольце. Две линии задержки на повторителях на двух логических элементах 2И выравнивают задержки и устраняют «риски» в выходных сигналах схемы управления ключами инвертора.



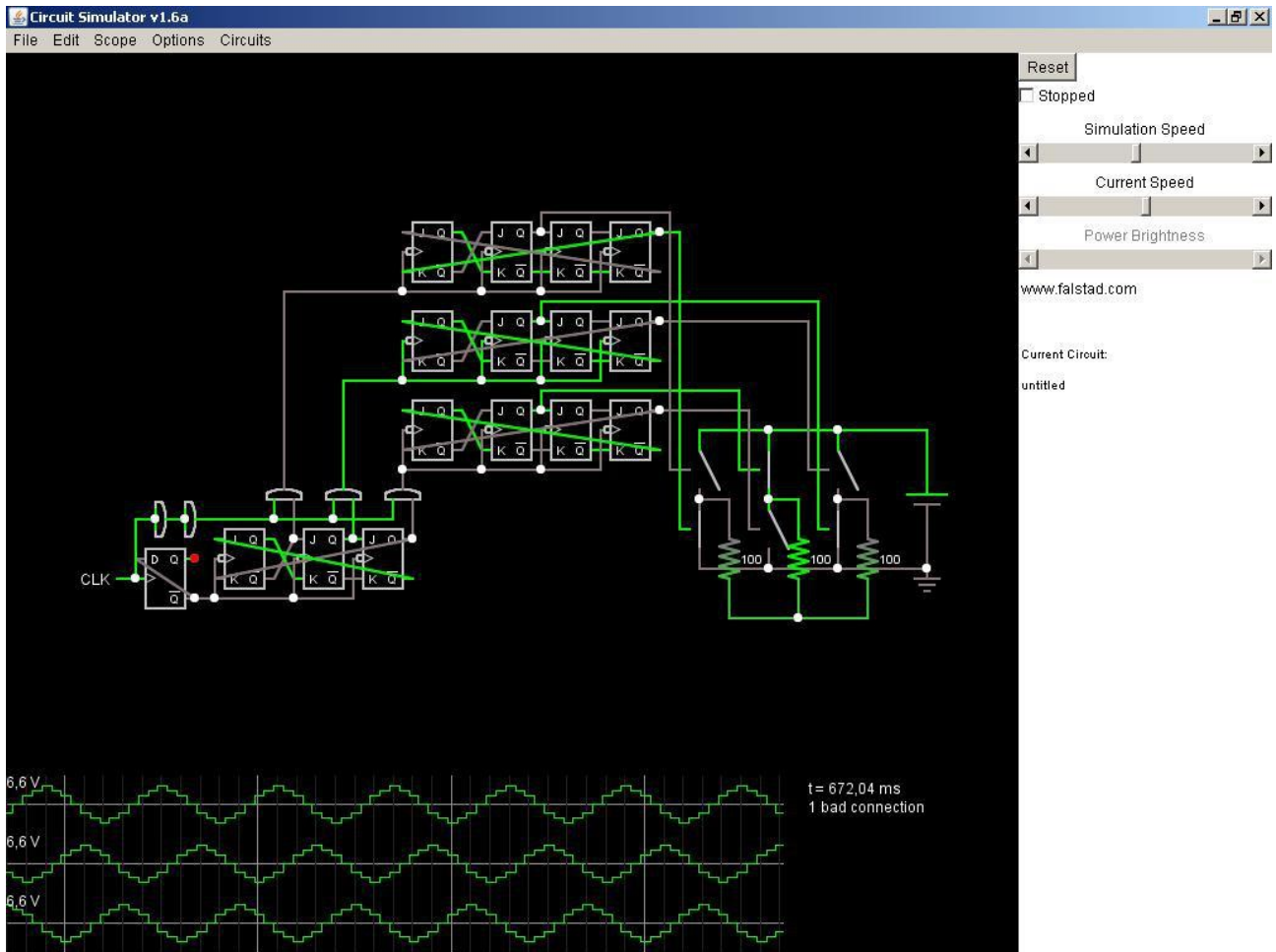


Рис. 5. Снимок с экрана модели №2 3-х фазного инвертора (преобразователя) по схеме Ларионова с включением нагрузки звездой со  $150^\circ$ -ным углом коммутации в симуляторе электронных схем Circuit Simulator v1.6a.

#### Литература.

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. - 392 с., ил. <http://www.toroid.ru/basharinAV.html>
2. Симулятор электронных схем Circuit Simulator v1.6a <http://www.falstad.com/circuit/>

#### Приложение 1.

Код модели №1 инвертора (преобразователя) по схеме Ларионова с включением нагрузки звездой со  $150^\circ$ -ным углом коммутации в симуляторе электронных схем Circuit Simulator v1.6a:

<http://andserkul.narod.ru/larionov-zvezda-150c.txt>

#### Приложение 2.

Код модели №2 инвертора (преобразователя) по схеме Ларионова с включением нагрузки звездой со  $150^\circ$ -ным углом коммутации в симуляторе электронных схем Circuit Simulator v1.6a:

<http://andserkul.narod.ru/UUCascade3.2.txt>