

Научная статья
УДК 518.68:612.8:001.57
doi:10.46684/2687-1033.2022.3.176-182

Реализация алгоритма модуляции пространственного вектора напряжения с помощью искусственной нейронной сети

Ким Гым Чхор¹, Ким Гым Сен²

^{1,2} Пхеньянский университет путей сообщения; г. Пхеньян, КНДР

АННОТАЦИЯ

Предложен алгоритм пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (Space vector pulse width modulation — SVPWM) на основе искусственной нейронной сети.

В расчетах времени действия векторов напряжения по традиционному алгоритму SVPWM в качестве переменных используют значения относительного фазового угла на секторах, это вызывает сложности в их вычислении.

Для преодоления данных недостатков составлены математические модели, определяющие время открытия силового элемента по абсолютному фазовому углу на инверторном преобразователе. Поскольку математические модели имеют различные виды расчетных формул по секторам и невозможно выразить их в однозначной формуле, для устранения этих трудностей построена функция с помощью искусственной нейронной сети, с помощью которой можно обобщенно определять время открытия силового элемента по фазам A , B и C .

Независимо от секторов, алгоритм SVPWM устанавливает время открытия силового элемента по фазовому углу θ на инверторном преобразователе.

Проведена проверка обобщенной способности искусственной нейронной сети и ее точности, а также времени операции моделирования в среде MATLAB.

Предложенный способ позволяет достигнуть высокой точности регулирования скорости и значительно сократить время операции.

При управлении тяговым приводом электроподвижного состава с асинхронным тяговым двигателем можно уменьшить период регулирования, в итоге повышается тяговая способность электропоездов метрополитена с векторным управлением или с прямым управлением моментом примерно в 1,1–1,2 раза.

Ключевые слова: SVPWM; искусственная нейронная сеть; асинхронный двигатель; инвертор; фазовый угол; время открытия и закрытия; вектор напряжения; контроль реального времени; алгоритм

Для цитирования: Ким Гым Чхор, Ким Гым Сен. Реализация алгоритма модуляции пространственного вектора напряжения с помощью искусственной нейронной сети // Техник транспорта: образование и практика. 2022. Т. 3. Вып. 2. С. 176–182. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2022.2.176-182>

Original article

Implementation of the spatial voltage vector modulation algorithm using an artificial neural network

Kim Gum Chol¹, Kim Gum Song²

^{1,2} Pyongyang Transport University; North Korea, Pyongyang

ABSTRACT

An algorithm for space vector pulse width modulation (SVPWM) based on an artificial neural network is proposed.

In calculating the action time of the voltage vectors according to the traditional SVPWM algorithm, the values of the relative phase angle on the sectors are used as variables, which causes difficulties in their calculation.

To overcome these shortcomings, mathematical models have been compiled that determine the opening time of the power element by the absolute phase angle on the inverter converter. Since mathematical models have dif-

© Ким Гым Чхор, Ким Гым Сен, 2022

ferent types of calculation formulas for sectors and it is impossible to express them in an unambiguous formula, to eliminate these difficulties, a function was built using an artificial neural network, with which you can generally determine the opening time of a power element in phases A, B and C.

Regardless of the sectors, the SVPWM algorithm sets the opening time of the power element according to the phase angle θ on the inverter converter.

The generalized ability of the artificial neural network and its accuracy, as well as the simulation operation time in the MATLAB environment, were tested.

The proposed method makes it possible to achieve high speed control accuracy and significantly reduce the operation time.

When controlling the traction drive of an electric rolling stock with an asynchronous traction motor, it is possible to reduce the regulation period, as a result, the traction capacity of electric locomotives and metro electric trains with vector control or with direct torque control increases by about 1.1–1.2 times.

Keywords: SVPWM; artificial neural network; asynchronous motor; inverter; phase angle; opening and closing times; voltage vector; real time control; algorithm

For citation: Kim Gum Chol, Kim Gum Song. Implementation of the spatial voltage vector modulation algorithm using an artificial neural network. *Transport technician: education and practice*. 2022;3(2):176-182. (In Russ.). <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2022.2.176-182>.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционный алгоритм пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) (Space vector pulse width modulation — SVPWM) обычно составлен из решения местонахождения опорного пространственного вектора напряжения, расчетов U_d , U_q , синусоидальных и косинусоидальных величин, а также определений секторов, времени открытия и его постоянной и т.д. Это требует трудоемких вычислений и влияет на регулирование скорости в реальном времени.

Цель исследования — упрощение реализации и расчетов SVPWM, повышение скорости срабатывания и точности обработки всей системы.

В работе [1] предложен расчет SVPWM по времени смещения для устранения имеющихся сложностей.

Другие авторы предлагают алгоритм SVPWM, вычисляющий время переключения с использованием виртуальной реальности [2, 3]. При этом способе не требуются расчет секторов и информация о фазовом угле.

Также представлен классифицированный алгоритм для реализации пространственно-векторной модуляции (SVM) в асинхронном приводе, с плавным переходом от ШИМ к типу работы прямоугольного сигнала, экспериментально доказано значительное сокращение времени операции в районах линейной модуляции и перемодуляции, и повышение точности [4].

Для упрощения механизма SVPWM приведен метод расчета времени действия базисного вектора на основе линейного напряжения с применением только общего расчета четырех действий [5, 6].

Поскольку на практике для этого метода необходимо Clark-преобразование в расчете линейного

напряжения векторным напряжением, требуется операция иррационального числа. Также нельзя реализовать 7-сегментную ШИМ выхода минимальной гармоник и окончательно предъявить значение таймера на компараторе ШИМ [7–16].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ SVPWM

В трехфазном инверторе состояние переключения силового элемента подразделяют на 8 видов и при преобразовании трехфазного напряжения на 2 ортогональных напряжения $[U_d, U_q]$, с помощью преобразования координат фаз от 3 к 2 классифицируются 8 векторов на 6 нулевых векторов с углом сдвига фаз 60° и 2 нулевых вектора.

Если базисный вектор напряжения U^* находится на первом секторе, как на рис. 1, то время действия составляющего вектора $U_1(100)$, $U_2(110)$ и нулевого вектора $U_0(000)$, $U_7(111)$ вычисляется следующим образом

$$\begin{aligned} t_1 &= 4KU^* \sin(60^\circ - \alpha) \\ t_2 &= 4KU^* \sin \alpha \\ t_0 &= T_{pwm} - (t_1 + t_2), \end{aligned} \quad (1)$$

где t_1 , t_2 — время действия U_1 и U_2 ; t_0 — время действия нулевого вектора; T_{pwm} — период PWM; α — фазовый угол U^* на секторе $0 \leq \alpha < 60^\circ$; $K = \frac{T_{pwm}}{2\sqrt{2}U_{dc}}$, где

U_{dc} — напряжение промежуточного каскада постоянного тока.

В формуле (1) α — фазовый угол на секторе нахождения базисного векторного напряжения U^* .

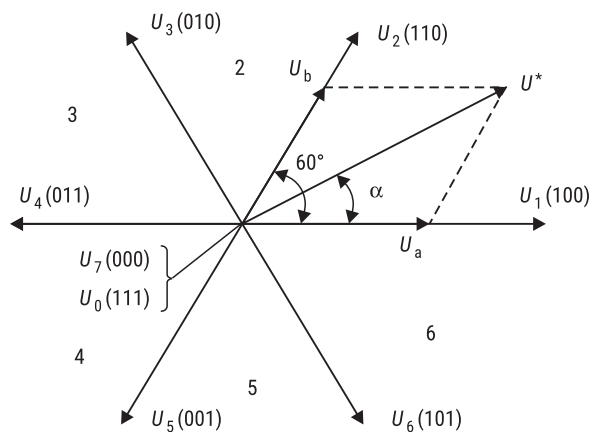


Рис. 1. Пространственный вектор напряжения на секторах

Как видно из выражения (1), требуются трудоемкие вычисления, поскольку нужно определить величину абсолютного фазового угла базисного векторного напряжения и сектор его нахождения с переменной α относительно фазового угла.

Выведем формулу определения времени открытия силового элемента по абсолютному фазовому углу θ на секторе 1 по фазе А

$$T_{A_on} = \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* \left(-\frac{1}{2} \sin \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right), \quad (2)$$

где θ — фазовый угол, выражающий местонахождение базисного вектора ($\theta = 0 \sim 360^\circ$).

Аналогично можно выводить время открытия силового элемента на всех шести секторах и по фазам А, В и С

$$T_{A_on} = \begin{cases} \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* \left(-\frac{1}{2} \sin \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right), & S = 1, 4 \\ \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* (-\sqrt{3} \cos \theta), & S = 2, 5 \\ \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* \left(\frac{1}{2} \sin \theta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right), & S = 3, 6 \end{cases}$$

$$T_{B_on} = \begin{cases} \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* \left(-\frac{3}{2} \sin \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right), & S = 1, 4 \\ \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* (-\sin \theta), & S = 2, 5 \\ \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* \left(-\frac{1}{2} \sin \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right), & S = 3, 6 \end{cases}, \quad (3)$$

$$T_{C_on} = \begin{cases} \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* \left(\frac{1}{2} \sin \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right), & S = 1, 4 \\ \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* \sin \theta, & S = 2, 5 \\ \frac{T_{pwm}}{4} + KU^* \left(\frac{3}{2} \sin \theta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta \right), & S = 3, 6 \end{cases}$$

где S — номер сектора.

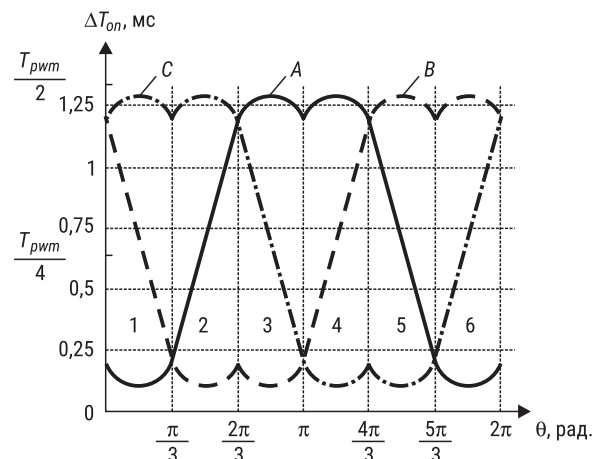


Рис. 2. Время открытия на всех секторах

В случае нормальной модуляции величина базисного векторного напряжения устанавливается линейно по коэффициенту модуляции, и время открытия является функцией фазового угла θ . Также по секторам оно рассчитывается различно.

При $T_{pwm} = 2,77$ мс время открытия по фазам А, В и С и фазовому углу θ можно рассмотреть универсально, как показано на рис. 2.

Как видно из рис. 2, время открытия по фазам А, В и С имеет одинаковый вид и угол между фазами 120° , номер секторов — 1~6.

В районе нормальной модуляции верхний предел времени открытия — $T_{pwm}/2$, его нижний предел — 0, а при $U^* = 0 - T_{pwm}/4$.

Форма возникающего сигнала SVPWM симметрична, поэтому время закрытия рассчитывается так

$$T_{off} = T_{pwm} - T_{on}. \quad (4)$$

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА SVPWM С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Установление времени открытия по формуле (3) требует трудоемких вычислений в связи с расчетом сектора и тригонометрической функции. В данной работе с целью обобщенного определения времени открытия трех фаз применена нейронная сеть только со значением абсолютного фазового угла. С использованием формулы (3) спроектирована нейронная сеть переднего направления на основе определения возможного времени открытия и данных ее обучения с изменением фазового угла θ независимо от секторов.

Блок-схема нейронной сети, реализующая алгоритм SVPWM по значению фазового угла θ , приведена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, нейронная сеть составлена из трех слоев: входного, промежуточного и выходного.

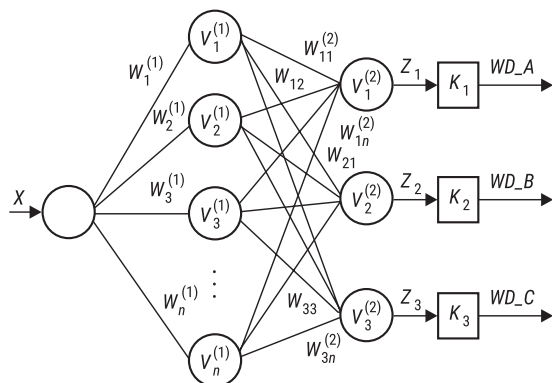


Рис. 3. Блок-схема нейронной сети SVPWM

Входом данной нейронной сети является абсолютный фазовый угол θ , а выходом соответственно время открытия трех фаз A, B и C.

Так как время открытия и закрытия предполагаемого силового элемента — непрерывная функция, количество скрытого слоя составляет 1.

Характеристика работы нейронной сети (рис. 3) выражается следующим образом

$$\left. \begin{aligned} V_i^{(1)} &= xw_i^{(1)} \\ y_i &= f_1(V_i^{(1)}) \\ V_j^{(2)} &= \sum_{i=1}^n y_i w_{ji}^{(2)} \\ Z_j &= f_2(V_j^{(2)}) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где x — вход нервной клетки; $w_i^{(1)}$ — вес связи между клеткой входного слоя и i -й клеткой промежуточного слоя; $V_i^{(1)}$ — состояние i -й клетки промежуточного слоя; $w_{ji}^{(2)}$ — вес связи между i -й клеткой промежуточного слоя и j -й клеткой выходного слоя; $V_j^{(2)}$ — состояние j -й клетки выходного слоя; Z_j — выход нейронной сети; $i = 1 \dots n$, n — количество клеток промежуточного слоя; $j = 1 \dots m$, m — количество клеток выходного слоя.

В формуле (5) x обозначает фазовый угол θ , а выход нейронной сети Z_j ($j = 1, 2, 3$) — параметры, соответствующие времени открытия фаз A, B и C, которые являются частями тригонометрической функции.

Время открытия определяется так

$$T_{P_SW} = K_S \left(1 + \frac{\sqrt{2}U^*}{U_{dc}} Z_P \right), \quad (6)$$

где $P = A, B, C$ — индекс, обозначающий фазу; SW — индекс, показывающий включение или выключение; Z_P — выход нейронной сети; $K_S = T_s/4$.

В качестве двоичных чисел таймера, входящих на компаратор блока управления, значения WD_A , WD_B , WD_C преобразуются по следующей формуле

$$WD_P = T_{P_SW} \cdot f_{CLK},$$

где f_{CLK} — базисная тактовая частота таймера блока управления.

Использована гиперболическая функция тан-

генса $\phi(x) = \text{tansig}(x) = \frac{2}{1 + \exp(-\alpha x)} - 1$ для нелиней-

ной функции $\phi_1(\bullet)$, $\phi_2(\bullet)$ — линейная функция.

При фазовом угле $\theta = 0 \sim 360^\circ$ получено 120 данных для обучения нейронной сети.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА SVPWM С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ЕГО ПРОВЕРКА

1. Моделирование искусственной нейронной сети

В среде MATLAB7.10 проведено моделирование искусственной нейронной сети для реализации алгоритма SVPWM.

Когда количество клеток скрытого слоя достигает $m = 19$, создается нейронная сеть, в которой входом служит абсолютный фазовый угол базисного векторного напряжения, а выходом — время открытия фазы A, B и C по `net = newff([0 6.3], [19 3], {'tansig', 'purelin'})` с использованием функции `newff`.

После обучения нейронной сети по `net1 = train(net, P, T)` при числе повторяющих шагов `net.trainParam.epochs = 6000` и заданной величине ошибок `net.trainParam.goal = 1e-07` результат ее моделирования по `Y = sim(net1, P)` с использованием синусоидальной функции `MSE = 8.923e-07` показан на рис. 4.

Как показано на рис. 4, в результате обучения получена погрешность ± 3 мкс и в точках фазовых углов 60, 120, 180, 240°, т.е. в точке перегиба волны и на месте изменения ее формы получается относительно много ошибок, а в других местах — сравнительно мало.

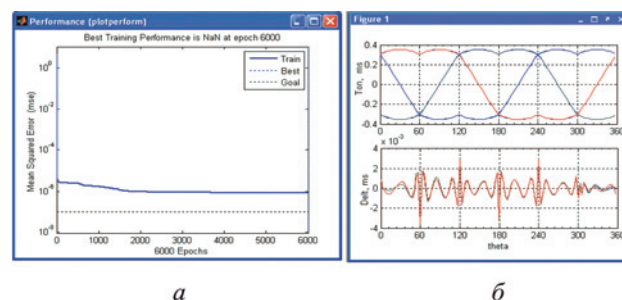


Рис. 4. Результат обучения нейронной сети: а — изменение MSE по числам шагов; б — время открытия и погрешность по фазовым углам

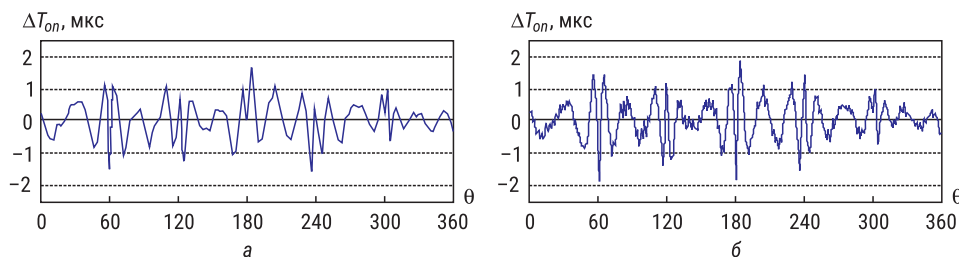


Рис. 5. Характеристика ошибки по фазовым углам: а — при $m = 125$ ($\Delta\theta = 2,88^\circ$); б — при $m = 250$ ($\Delta\theta = 1,44^\circ$)

2. Проверка обобщенной способности нейронной сети

Поскольку для организации нейронной сети данные обучения по времени открытия составлены по интервалам фазового угла $\Delta\theta = 3^\circ$ с 120 равными частями одного периода выходной частоты, то время открытия, соответствующее фазовому углу по трехкратным числам, становится обученными значениями.

В составленной модели модуляции существует и случай, когда фазовый угол не соответствует трехкратным числам при различной выходной частоте, поэтому проверка свидетельствует об обобщенной способности.

На рис. 5 представлена характеристика ошибки по фазовым углам при числах равных частей $m = 125$ ($\Delta\theta = 2,88^\circ$) и $m = 250$ ($\Delta\theta = 1,44^\circ$), где ошибкой является разница между данными обучения и выходом нейронной сети.

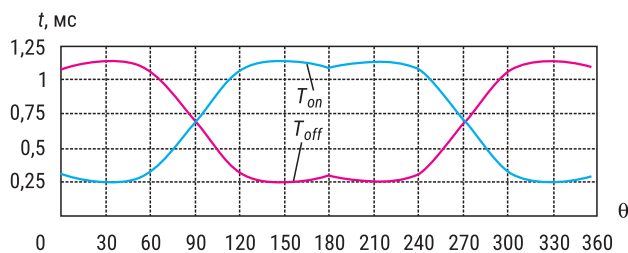


Рис. 6. График T_{on} , T_{off} нейронной сети

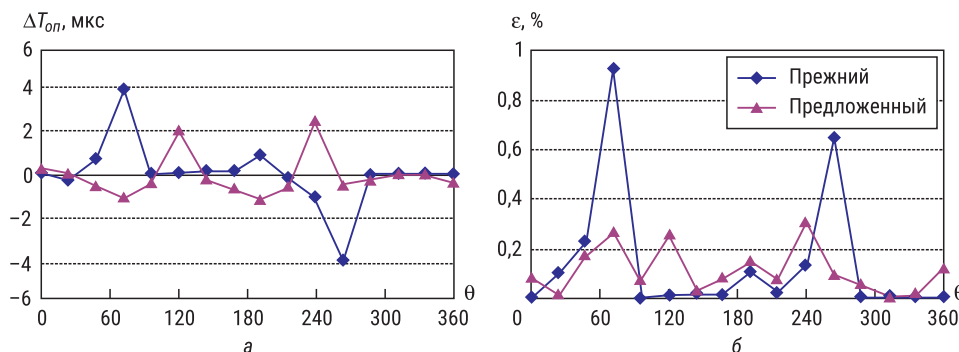


Рис. 7. График абсолютной и относительной ошибок T_{on} в сравнении с идеальным случаем: а — абсолютная погрешность; б — относительная погрешность

Из рис. 5 очевидно, что погрешность находится в пределах $\pm 1,9$ мкс и она похожа на характеристику ошибки, показанную на рис. 4.

3. Проверка точности

На рис. 6 приведен график времени открытия и закрытия в идеальном случае по предложенному способу при $N = 15$, $f = 30$ Гц.

Время открытия и закрытия в идеальном случае по традиционному (прежнему) и предложенному способам не совпадают, но разница между ними незначительна (рис. 6).

«Идеальный случай» означает установление местонахождения базисного векторного напряжения, расчеты синусоидального и косинусоидального значений, U_d и U_q , время действия вектора, определение секторов, времени открытия и его постоянного значения и т.д. при идеальном условии без ошибки. В прежнем способе операция и обработка реализованы с помощью цифрового процессора сигналов (DSP), в представленном способе алгоритма нейронной сети SVPWM также с его использованием.

На рис. 7 показан анализ абсолютной и относительной ошибок времени открытия при прежнем и предложенном способах в сравнении с идеальным случаем при $N = 15$, $f = 30$ Гц.

Как видно из рис. 7, в предложенном способе абсолютная погрешность времени уменьшена с 3,9

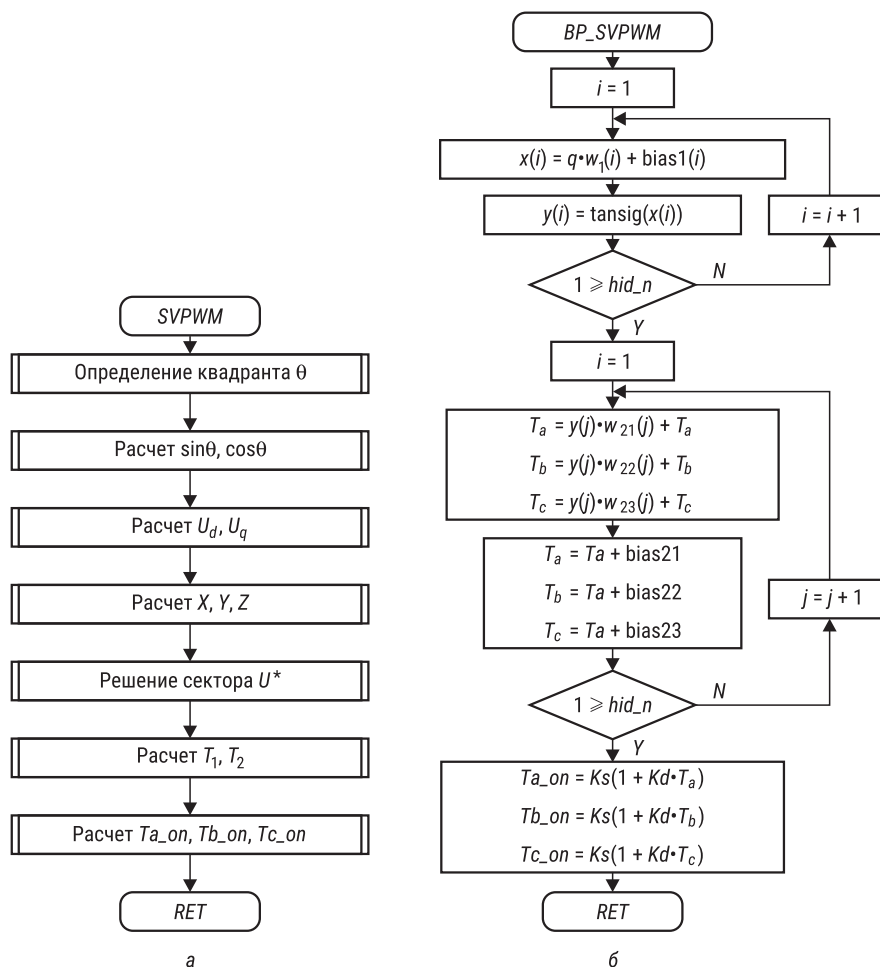


Рис. 8. Блок-схема программы обработки SVPWM:

а — процесс обработки в прежнем способе; б — процесс обработки в предложенном способе

до 2,42 мкс по сравнению с прежним, а относительная — с 0,93 до 0,3 %.

Причина ошибки заключается в существовании погрешностей квантования синусоидального и косинусоидального значений, а также в расчетах высокого десятичного разряда бесконечной десятичной дроби и дробного числа по Q -й форме и т.д. при операции и обработке с применением цифрового процессора сигналов (DSP).

4. Проверка времени выполнения операции

Для проверки по сокращению времени выполнения операции проведен сравнительный анализ между прежним и предложенным способами.

На рис. 8 показана блок-схема программы обработки SVPWM в прежнем и предложенном способах.

Из рис. 8, б видно, что для реализации операции гиперболической функции тангенс $\text{tansig}(x)$ на цифровом процессоре сигналов DSP значения x от 0 до 5 разделены по автономному режиму на 2000 равных частей и по ним проведены расчеты, на практике гиперболическая функция тангенс $\text{tansig}(x)$ найдена с помощью метода поиска таблиц по x .

На основе блок-схемы (рис. 8) разработаны программы и измерено время реализации операции соответственно по известному и предложенному способам.

В результате наблюдения за временем выполнения программ по двум способам оно составило 450 мкс в прежнем, а в предложенном 180 мкс. Таким образом, время операции сокращено примерно на 40 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном в данном исследовании способе время выполнения операции сокращено примерно на 40 %, относительная погрешность уменьшена с 0,93 до 0,3 %, в результате чего увеличена точность в 3,1 раза.

При использовании SVPWM по предложенной нейронной сети упрощается алгоритм, увеличивается точность операции и значительно сокращается время ее реализации по сравнению с традиционным механизмом, что дает возможность повысить скорость срабатывания системы управления.

Используя вышеуказанные преимущества, при управлении тяговым приводом электроподвижного состава с асинхронным тяговым двигателем можно уменьшить период регулирования, в итоге

повышается тяговая способность электровозов и электропоездов метрополитена с векторным управлением или с прямым управлением моментом примерно в 1,1–1,2 раза.

REFERENCES

1. Kim J.S., Sul S.K. A novel voltage modulation technique of the space vector PWM. In *Conf. Rec. IPEC'95*. Yokohama, Japan, 1995; 742-747.
2. Reddy N.R., Teegala B.R., Amarnath J., Rayudu D.S. Simplified SVPWM Algorithm for Vector Controlled Induction Motor Drive Using the Concept of Imaginary Switching Times. *International Journal of Recent Trends in Engineering*. 2009;2(5):288-290.
3. Reddy T.B., Amamath R.J., Subbarayudu D. Improvement of DTC performance by using hybrid space vector Pulsewidth modulation algorithm. *International Review of Electrical Engineering*. 2007;4(2):593-600.
4. Bakhshai A.R., Joos G., Jain P.K., Jin H. Incorporating the Overmodulation Range in Space Vector Pattern Generators Using a Classification Algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2000;15(1):83-91. DOI: 10.1109/63.817366
5. Tripathi A., Khambadkone A.M., Panda S.K. Torque Ripple Analysis and Dynamic Performance of a Space Vector Modulation Based Control Method for AC-Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2005;20(2):485-492. DOI: 10.1109/tpel.2004.842956
6. Narayanan G., Ranganathan V.T. Extension of Operation of Space Vector PWM Strategies With Low Switching Frequencies Using Different Overmodulation Algorithms. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002;17(5):788-798. DOI: 10.1109/tpel.2002.802190
7. Zhan C., Arulampalam A., Jenkins N. Four-Wire Dynamic Voltage Restorer Based on a Three-Dimensional Voltage Space Vector PWM Algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2003;18(4):1093-1102. DOI: 10.1109/tpel.2003.813772
8. Ma J.D., Wu B., Zargari N.R., Rizzo S.C. A Space Vector Modulated CSI-Based AC Drive for Multimotor Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2001;16(4):535-544. DOI: 10.1109/63.931075
9. Trzynadlowski A.M., Bech M.M., Blaabjerg F., Pedersen J.K., Kirlin R.L., Zigliotto M. Optimization of Switching Frequencies in the Limited-Pool Random Space Vector PWM Strategy for Inverter-Fed Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2001;16(6):852-857. DOI: 10.1109/63.974384
10. Narayanan G., Ranganathan V.T. Two Novel Synchronized Bus-Clamping PWM Strategies Based on Space Vector Approach for High Power Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002;17(1):84-93. DOI: 10.1109/63.988673
11. Tunyasirunt S., Srilad S., Suksri T. Comparison power quality of the voltage source inverter type SVPWM and SPWM technique for induction motor drive. *2008 SICE Annual Conference*. 2008. DOI: 10.1109/sice.2008.4654659
12. Guo G., You W. Quality analysis of SVPWM inverter output voltage. *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*. 2008. DOI: 10.1109/csse.2008.666
13. Shaobang X., Ke-You Z. Research on a novel SVPWM algorithm. *2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. 2007. DOI: 10.1109/iciea.2007.4318734
14. Trzynadlowski A.M. An overview of modern PWM techniques for three-phase, voltage-controlled, voltage-source inverters. *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 1996. DOI: 10.1109/isie.1996.548389
15. Casadei D., Serra G., Tani K. Implementation of a direct control algorithm for induction motors based on discrete space vector modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2000;15(4):769-777. DOI: 10.1109/63.849048
16. Holtz J. Pulsewidth modulation-a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1992;39(5):410-420. DOI: 10.1109/41.161472

Об авторах

Ким Гым Чхор — доктор технических наук, доцент, преподаватель; **Пхеньянский университет путей сообщения**; КНДР, г. Пхеньян, Хенчжесанский район, Хадан-1;

Ким Гым Сен — кандидат технических наук; преподаватель; **Пхеньянский университет путей сообщения**; КНДР, г. Пхеньян, Хенчжесанский район, Хадан-1.

Bionotes

Kim Gum Chol — Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, lecturer; **Pyongyang Transport University**; North Korea, Pyongyang, Hengshan district, Hadan-1;

Kim Gum Song — Cand. Sci. (Econ.), lecturer; **Pyongyang Transport University**; North Korea, Pyongyang, Hengshan district, Hadan-1.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.02.2022; одобрена после рецензирования 25.04.2022; принята к публикации 30.05.2022. The article was submitted 22.02.2022; approved after reviewing 25.04.2022; accepted for publication 30.05.2022.