

УДК 621.314

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ВЕКТОРНОЙ ШИМ В МНОГОУРОВНЕВОМ АВТОНОМНОМ ИНВЕРТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Шавелкина А.А., студент; Шавелкин А.А., доцент, к.т.н.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина)

Электропривод переменного тока с автономными инверторами напряжения (АИН) с ШИМ занял прочные позиции в самых различных сферах применения. Совершенствуются в основном принципы реализации управления (векторная ШИМ, прямое управление моментом и т.д.). Вместе с тем, все чаще ставится вопрос о недостатках метода ШИМ, связанных с импульсной формой входного тока и выходного напряжения и, как следствие, необходимостью установки входных и выходных фильтров в схемах преобразователей частоты (ПЧ).

Естественно, что особенно при больших мощностях привода, когда вопросы энергетики выходят на первый план, все чаще ставится вопрос об улучшении формы выходного напряжения и входного тока преобразователя [1]. Это достигается применением многоуровневых АИН (МАИН) [2].

Схема одной фазы МАИН с тремя уровнями напряжения источника и использованием фиксирующих (clamped) диодов (VD7 - VD10) приведена на рис.1.

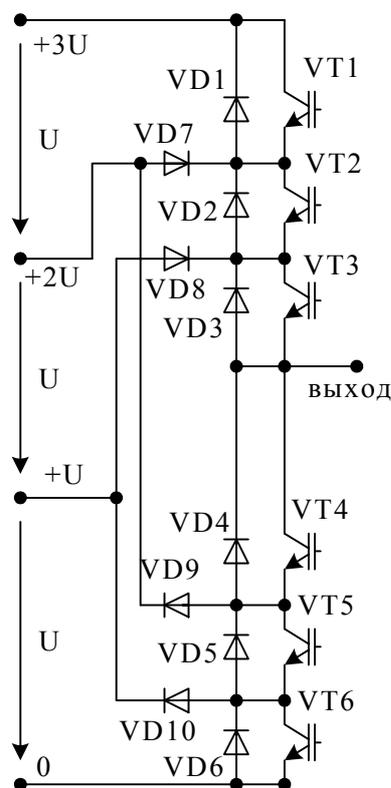


Рисунок 1 - Схема фазы АИН с тремя уровнями источника питания

Большое число ключей схемы обуславливает сложность управления.

Использование при формировании выходного напряжения инвертора метода пространственного вектора (векторной ШИМ) открывает широкие возможности управления, включая варианты с изменением числа уровней выходного напряжения, а также использование при разных уровнях напряжения питания. При этом возможно обеспечить минимальное число коммутаций транзисторов (ключей) схемы, если на каждом интервале коммутации переключение осуществляется только в одной фазе инвертора, причем без увеличения частоты коммутации.

Пространственные векторы выходного напряжения АИН приведены на рис 2. В зависимости от уровня напряжения имеем 6 возможных векторов, конец которых скачкообразно перемещается по траектории соответствующей правильному шестиграннику (предельный случай). Поскольку в данном случае не преследуется цель получения максимального значения первой гармоники, что приводит к ухудшению гармонического состава, в дальнейшем предполагается получение вращаю-

щегося вектора. При этом в качестве предельной траектории рассматриваем окружность, вписанную в шестигранник. При трех уровнях напряжения имеем соответственно три окружности (см. рис.2)

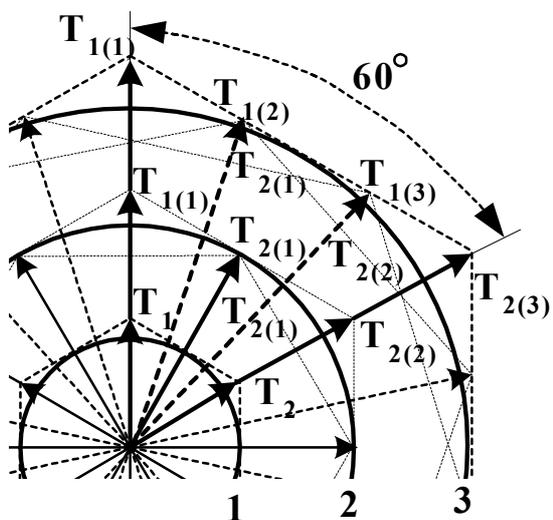


Рис.2. Пространственный вектор напряжения МАИН

Следует отметить, что работа схемы имеет свои особенности в зависимости от величины выходного напряжения:

- использование одного уровня напряжения питания  $U$  (традиционная схема мостового АИН). При этом в схеме используется 6 ненулевых и 2 нулевых состояния (вектора);
- использование двух уровней напряжения  $U$  и  $2U$  добавляет еще 12 ненулевых и 1 нулевое состояния;
- использование трех уровней напряжения  $U$ ,  $2U$  и  $3U$  - добавляется еще 18 ненулевых и 1 нулевое состояния;

При этом общее число состояний в схеме  $8 + 13 + 19 = 40$ .

Сущность метода векторной ШИМ состоит в том, что на каждом из интервалов коммутации

результатирующий вращающийся пространственный вектор  $U$  формируется как сумма векторов  $T_1$  и  $T_2$  ограничивающих сектор, где он находится. Пространственное положение вектора определяется значением  $T_1$  и  $T_2$ . Изменение значений  $T_1$  и  $T_2$  осуществляется изменением относительной длительности включения ( $t_1$  и  $t_2$ ) соответствующих транзисторов схемы на периоде коммутации  $T_k$ . Регулирование величины напряжения достигается введением нулевого вектора  $T_0$  длительность которого  $t_0$  (длительности  $t_1$  и  $t_2$  соответственно пропорционально уменьшаются).

Уровень – 1. Вектор напряжения имеет 6 фиксированных положений. Радиус окружности равен  $\sqrt{3}/2U$ . Сектор в котором формируется вращающийся вектор составляет  $60^\circ$ . Слагаемые ненулевые  $T_1$ ,  $T_2$  и нулевой  $T_0$  вектора (относительные времена нахождения схемы в соответствующих границам сектора состояниях по отношению к периоду модуляции  $T_k$ ) определяются выражениями:

$$T_1 = \sqrt{3}/2 \cdot (\cos \alpha - (\sin \alpha)/\sqrt{3}), \quad T_2 = \sin \alpha, \quad t_0 = T_k - t_1 - t_2,$$

где  $\alpha$  - угол поворота вектора в пределах сектора,  $t_i$  - интервалы времени для соответствующих состояний.

Уровень – 2. В пределах исходного сектора ( $60^\circ$ ) имеем 2 сектора по  $30^\circ$ . Тогда для первого из них - сектора 1 соответствующие интервалы времени:

$$T_{1(1)} = \sqrt{3}/2 \cdot (\cos \alpha - \sqrt{3} \cdot \sin \alpha), \quad T_{2(1)} = 2 \cdot \sin \alpha, \quad t_0 = T_k - t_1 - t_2.$$

Для второго сектора:

$$T_{1(2)} = (\cos \alpha - \sqrt{3} \cdot \sin \alpha), \quad T_{2(2)} = \sqrt{3} \cdot \sin \alpha, \quad t_0 = T_k - t_1 - t_2.$$

Уровень 3. В пределах исходного сектора ( $60^\circ$ ) имеем 3 сектора по  $20^\circ$ .

Для сектора 1:

$$T_{1(1)}=0.985 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} 20^\circ), T_{2(1)}=0.866 \cdot \sin \alpha / \sin 20^\circ, t_0=T_k - t_1 - t_0.$$

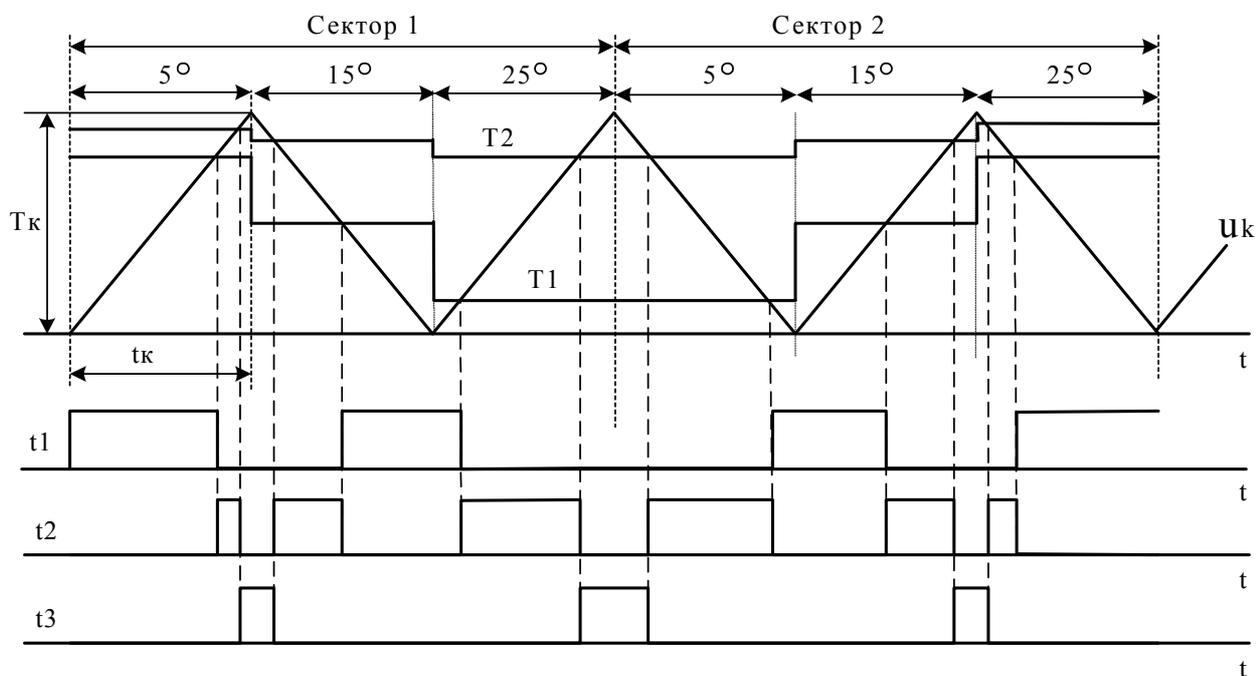
Для сектора 2:

$$T_{1(2)}=0.866 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} 20^\circ), T_{2(2)}=0.985 \cdot \sin \alpha / \sin 20^\circ, t_0=T_k - t_1 - t_0.$$

Для сектора 3:

$$T_{1(3)}=0.985 \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha \cdot \operatorname{ctg} 20^\circ), T_{2(3)}=0.985 \cdot \sin \alpha / \sin 20^\circ, t_0=T_k - t_1 - t_0.$$

Порядок чередования векторов  $T_1, T_2, T_0, T_2, T_1, \dots$ . Принцип формирования соответствующих временных интервалов приведен на рис.3. При этом соответствующие импульсы ( $t_1, t_2, t_3$ ) формируются в результате сравнения напряжений  $T_1, T_2$  и напряжения  $u_k$  треугольной формы, частота которого  $f_T = f_M/2$  ( $f_M = 1/t_k$  – частота модуляции, в данном случае  $1800\text{Гц}$ ), а амплитуда –  $T_k$ . При этом рас-



*Рисунок 3 – принцип формирования длительностей нахождения АИН в состояниях соответствующих  $T_1, T_2, T_3$*

считывается дискретность перемещения вектора в  $10^\circ$ , чему соответствует 36 положений вектора напряжения за оборот (период).

Наличие нулевого вектора (состояния)  $T_0$  увеличивает пульсации выходного напряжения АИН. Замена нулевого вектора на ненулевой вектор возможна на уровнях 2 и 3 путем использования ненулевого (но меньшего по амплитуде, чем базовый вектор) вектора  $T_3$  из нижнего уровня, входящего в этот сектор. Длительность соответствующего базового вектора  $T_i$  ( $T_1$  или  $T_2$ ) при этом сокращается. Пусть величина вектора  $T_3$  (см. рис.2) относительно базового  $T_i$ , с которым совпадает по направлению  $T_3$  (или его проекция на базовый вектор) составляет  $T_3 = T_i \cdot K$  ( $K < 1$ ). Коэффициент модуляции выходного напряжения  $\mu$

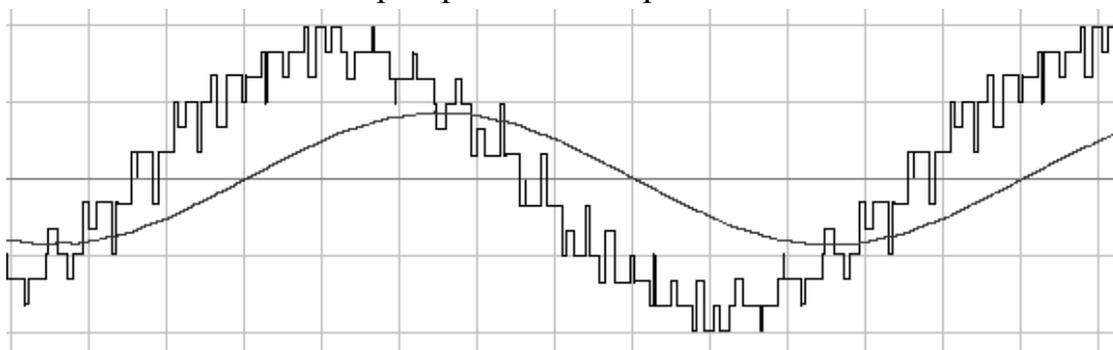
( $\mu=1$  – соответствует граничному вращающемуся вектору). Тогда из условия сохранения среднего значения напряжения на интервале  $T_k$  получаем:

$$\mu \cdot T_i \cdot t_i = \mu \cdot T_i (t_i - \Delta t) + (t_0 + \Delta t) \cdot T_3$$

где:  $(t_0 + \Delta t) = t_3$  – длительность состояния соответствующего ненулевому вектору  $T_3$ .

Отсюда значение  $\Delta t = t_0 / (\mu/k - 1)$ . При этом возможны ограничения, поскольку должно выполняться условие  $(t_i - \Delta t) \geq 0$  или  $t_i \geq \Delta t$ . В противном случае необходимо корректировать также длительность и другого базового вектора  $T_i$ .

Полученные соотношения использованы при реализации модели рассмотренной схемы МАИН с использованием программы EWB. Осциллограмма выходного фазного напряжения и тока МАИН, соответствующая ( $\mu=1$ ) для 3 уровня при дискретности изменения угла поворота вектора напряжения 10 градусов - 36 положений вектора приведена на рис.4.



*Рисунок 4 – Осциллограммы выходного напряжения и тока фазы МАИН*

Проведенные исследования подтверждают целесообразность использования метода векторной ШИМ в многоуровневых инверторах. Этот метод эффективен при изменении числа уровней в кривой выходного напряжения, а также при различных уровнях напряжения питания, позволяет уменьшить частоту и число коммутаций ключей схемы.

#### Перечень ссылок

1. Гречко Э., Кот Э. Многоуровневые трехфазные инверторы напряжения с поуровневой синусоидальной ШИМ. Технічна електродинаміка. Тематический выпуск. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 2. Київ. 2002. с.50-53.
2. José Rodríguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng. Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 49, NO. 4, AUGUST 2002.