

## Оптимизация частоты коммутации двухуровневого автономного инвертора напряжения

*Рассмотрено влияние частоты коммутации автономного инвертора напряжения, выполненного на IGBT-транзисторах, на установленную мощность его элементов. Даны рекомендации по выбору частоты для двухуровневого автономного инвертора средней мощности.*

Автономные инверторы напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) находят широкое применение в агрегатах бесперебойного питания, в системах автономного электроснабжения и других подобных источниках, формирующих выходное переменное напряжение, качество которого должно соответствовать требованиям действующих стандартов. Одним из возможных вариантов такой системы является ветроустановка на базе асинхронного вентильного каскада (АВК), в которой возбуждение асинхронного генератора и, соответственно, формирование кривой напряжения нагрузки осуществляется от АИН [1]. Для обеспечения требуемого высокого качества выходного напряжения целесообразно использовать ШИМ и низкочастотный выходной фильтр. Значение частоты коммутации является решающим фактором при расчете параметров выходного фильтра, оказывающим существенное влияние на массогабаритные показатели всей системы. С появлением более быстродействующих приборов (например, IGBT-транзисторов), а также в связи с их дальнейшей миниатюризацией (путем создания интеллектуальных модулей), предложенные ранее рекомендации [2] нуждаются в уточнении.

На рис. 1 представлена схема однофазного двухуровневого АИН с выходным фильтром. Как показано в [3], масса и объем элементов преобразователя пропорциональны их установленной мощности. При этом переход от установленной мощности к массогабаритным показателям осуществляется с помощью весовых коэффициентов. Известно также, что масса и га-

бариты реактивных элементов (емкости и индуктивности фильтра) уменьшаются с ростом рабочей частоты, чем и объясняется наблюдаемая тенденция к повышению частоты коммутации в АИН. С другой стороны, при возрастании частоты коммутации, увеличивается мощность динамических потерь в полупроводниковых приборах, что в свою очередь приводит к увеличению мощности, отдаваемой охладителем в окружающее пространство и влечет за собой увеличение массы и габаритов охладителя. Таким образом, у функции суммарной установленной мощности от частоты должен наблюдаться минимум при некоторой частоте.

Целью настоящей статьи является уточнение оптимальной частоты коммутации двухуровневого автономного инвертора напряжения, выполненного на IGBT-транзисторах.

Установленную мощность системы инвертор-фильтр можно представить в виде суммы установленных мощностей ее компонентов [2]:

$$S = S_L + S_C + S_O, \quad (1)$$

где  $S_L$ ,  $S_C$ ,  $S_O$  – установленные мощности соответственно индуктивности фильтра, емкости фильтра и охладителей полупроводниковых приборов.

Пропорциональным массогабаритным показателем реактивного элемента величиной может служить его реактивная мощность, накапливаемая на некоторой базисной частоте  $\omega_6$ . В качестве такой базисной частоты удобно использовать частоту промышленной сети (50 Гц). В этом случае установленная мощность реактора фильтра будет определяться соотношением:

$$S_L = I_{\text{эф}} \cdot U_{\text{эф}} = K \omega_6 L I_{\text{эф}}^2 = \frac{1}{2} \cdot 314 L I_{\text{эф}}^2 = 157 L I_{\text{эф}}^2, \quad (2)$$

где  $K = 1/2$  – коэффициент приведения установленной мощности реактора к установленной мощности трансформатора [3] (когда в окне магнитопровода реактора размещена только одна обмотка),  $\omega_6 = 314$  – базисная частота;  $L$  – индуктивность фильтра;  $I_{\text{эф}}$  – эффективное значение тока нагрузки;  $U_{\text{эф}}$  – действующее значение напряжения на конденсаторе.

Если индуктивность реактора выразить через параметры фильтра:

$$L = \frac{\rho}{\omega_0}, \quad (3)$$

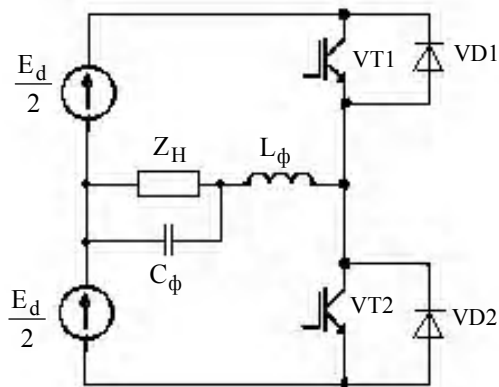


Рис. 1. Схема двухуровневого АИН

то установленную мощность реактора фильтра можно найти в виде:

$$S_L = 157 \frac{\rho I_{\text{эф}}^2}{\omega_0}, \quad (4)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота фильтра;  $\rho$  – волновое сопротивление фильтра.

Аналогично, для конденсатора накапливаемая на базисной частоте (50 Гц) реактивная мощность, определяющая его установленную мощность, равна:

$$S_c = I_{\text{эф}} \cdot U_{\text{эф}} = \omega_0 C U_{\text{эф}}^2 = 314 \cdot C U_{\text{эф}}^2, \quad (5)$$

где  $C$  – емкость конденсатора выходного фильтра.

Если емкость конденсатора выразить через параметры фильтра:

$$C = \frac{1}{\rho \omega_0}, \quad (6)$$

то установленную мощность конденсатора можно представить в виде:

$$S_c = 314 \frac{U_{\text{эф}}^2}{\rho \omega_0}. \quad (7)$$

В дальнейшем при расчете установленных мощностей реактивных элементов целесообразно сделать допущение о постоянстве соотношения между резонансной частотой фильтра и частотой коммутации. Например, предположим, что

$$\omega_0 = 0,1\omega, \quad (8)$$

где  $\omega_0$ ,  $\omega$  – резонансная частота фильтра и частота коммутации инвертора соответственно.

Массогабаритные показатели охладителей определяются мощностью, рассеиваемой в силовых полупроводниковых приборах, и условиями охлаждения. Мощность потерь в приборах содержит две составляющие:

$$S_O = P_S + P_D, \quad (9)$$

где  $P_D$ ,  $P_S$  – мощность динамических и статических потерь в полупроводниковых приборах.

Известно, что мощность динамических потерь пропорциональна частоте коммутации [2]. С учетом этого находится мощность динамических потерь [4, 5]:

$$P_D = W \cdot \frac{\omega}{2\pi}, \quad (10)$$

где  $W$  – полная энергия потерь на коммутацию полупроводникового прибора, которая может быть взята из справочных данных фирм-производителей или рассчитана. Для двухуровневого АИН она рассчитывается из соотношения [4]:

$$W = \frac{U}{\pi} \cdot \left[ (t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}} + t_{rr} + 1,5 \cdot 10^{-7}) \cdot I_m + 2Q_{rr} \right], \quad (11)$$

где  $t_{\text{вкл}}$ ,  $t_{\text{выкл}}$  – соответственно время включения и выключения IGBT-транзистора;  $t_{rr}$  – время обратного восстановления диода;  $Q_{rr}$  – заряд обратного восстановления диода,  $U$  – напряжение на транзисторе в закрытом состоянии,  $I_m$  – амплитуда тока нагрузки.

Следует отметить, что в справочных данных энергия потерь на коммутацию приведена для максимальных рабочих характеристик транзистора. При использовании приборов в других режимах следует произвести пересчет из соотношения [5]:

$$W^* = W \cdot \frac{U^*}{U_H} \cdot \frac{I^*}{I_H}, \quad (12)$$

где  $U^*$ ,  $I^*$  – соответственно значения напряжения и тока в режиме эксплуатации,  $U_H$ ,  $I_H$  – номинальные (справочные) значения напряжения и тока.

Путем подстановки выражений (4), (7), (8), (9) в соотношение (1), получим целевую функцию для полной установленной мощности двухуровневого АИН в зависимости от частоты:

$$S(\omega) = 157 \cdot \left( \frac{\rho I_{\text{эф}}^2}{0,1\omega} + \frac{2U_{\text{эф}}^2}{0,1\omega\rho} \right) + \frac{W^*}{2\pi} \cdot \omega + P_S. \quad (13)$$

Чтобы найти частоту коммутации, при которой установленная мощность системы инвертор-фильтр минимальна, требуется решить задачу однопараметрической оптимизации. Для исследования полученной функции (13) на экстремум (в данном случае – это минимум), необходимо продифференцировать ее по частоте. После решения полученного в результате дифференцирования уравнения относительно частоты коммутации, получим оптимальное значение частоты коммутации:

$$\omega_P^O = \sqrt{\frac{3140\pi \cdot (\rho^2 I_{\text{эф}}^2 + 2U_{\text{эф}}^2)}{W^* \rho}}, \quad (14)$$

Отсутствие в выражении (14) мощности статических потерь объясняется тем обстоятельством, что от частоты она не зависит, поэтому ее производная равна нулю.

Установленная мощность непосредственно не дает количественной оценки реальных массогабаритных показателей. Используя удельные массогабаритные показатели (весовые коэффициенты), которые являются коэффициентами пропорциональности между установленной мощностью и массой (или объемом), можно получить новые целевые функции: зависимость массы  $M$  и объема  $V$  АИН от частоты коммутации его транзисторов, по которым затем произвести оптимизацию АИН по новым критериям. С учетом этого получим:

$$M(\omega) = 314 \cdot \left( \frac{K_L^M \rho I_{\text{эф}}^2}{2} + \frac{K_C^M U_{\text{эф}}^2}{\rho} \right) \cdot \frac{1}{0,1\omega} +$$

$$+ K_O^M \left( \frac{W^*}{2\pi} \cdot \omega + P_{CT} \right); \quad (15)$$

$$V(\omega) = 314 \cdot \left( \frac{K_L^V \rho I_{\text{эф}}^2}{2} + \frac{K_C^V U_{\text{эф}}^2}{\rho} \right) \cdot \frac{1}{0,1\omega} + K_O^V \left( \frac{W^*}{2\pi} \cdot \omega + P_{CT} \right), \quad (16)$$

где  $K_L^M, K_C^M, K_O^M, K_L^V, K_C^V, K_O^V$  – соответственно удельные массы и объемы индуктивности, емкости и охладителя.

После нахождения экстремума функций (15) и (16), получим формулы для расчета оптимальных частот по массе и объему соответственно:

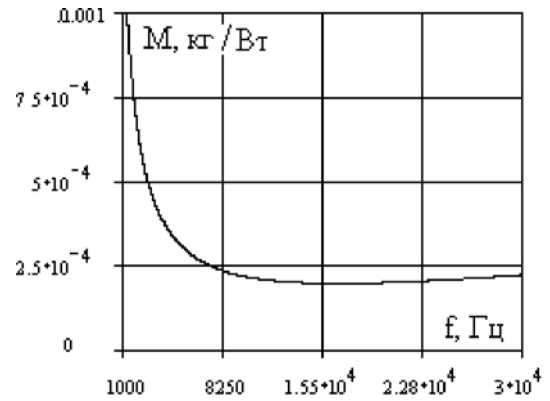
$$\omega_M^O = \sqrt{\frac{3140\pi \cdot (K_L^M \rho^2 I_{\text{эф}}^2 + 2K_C^M U_{\text{эф}}^2)}{K_O^M W^* \rho}}; \quad (17)$$

$$\omega_V^O = \sqrt{\frac{3140\pi \cdot (K_L^V \rho^2 I_{\text{эф}}^2 + 2K_C^V U_{\text{эф}}^2)}{K_O^V W^* \rho}}. \quad (18)$$

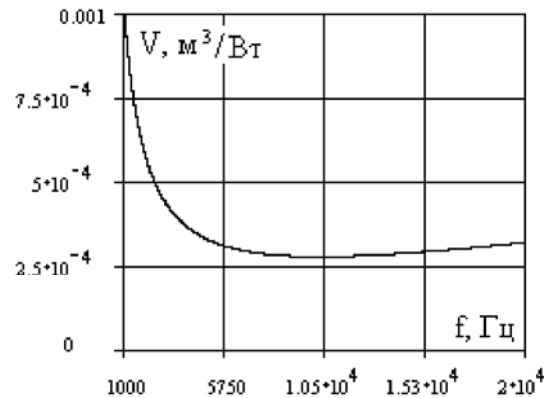
На рис. 2 представлены рассчитанные графики зависимостей массы  $M(\omega)$  и объема  $V(\omega)$ , отнесенные к мощности нагрузки, для двухуровневого АИН средней мощности, выполненного на IGBT-транзисторах типа U фирмы International Rectifier [5] с использованием весовых коэффициентов из [3]. Из рис. 2 следует, что с ростом частоты происходит заметное снижение массы и габаритов из-за их существенного уменьшения для реактивных элементов. После достижения минимума кривые возрастают незначительно. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности выбирать частоту инвертора в достаточно широком диапазоне.

Очевидно, что при использовании различной элементной базы весовые коэффициенты будут отличаться, и, следовательно, частота коммутации должна быть выбрана в каждом случае конкретно. Также использование весовых коэффициентов позволяет учесть влияние частоты на другие параметры реактивных элементов (например – на предельное напряжение для конденсаторов, что также влияет на их габариты).

Кроме того, при использовании принудительного охлаждения рассеиваемая мощность охладителя повышается с возрастанием скорости воздушного потока [5, 6]. Если воспользоваться допущением, что максимальную мощность рассеивания приблизительно можно принять пропорциональной:  $[1 + \sqrt{v}]$  (где  $v$  – скорость воздушного потока) [6], то весовые коэффициенты для охладителя окажутся пропорциональны:  $1/[1 + \sqrt{v}]$ . Тогда, используя формулы (17) и (18), мож-



а)



б)

Рис. 2. Зависимость массы (а) и объема (б) инвертора от частоты коммутации

но построить график зависимости оптимальной частоты коммутации АИН от скорости воздушного потока. На рис. 3 показаны такие зависимости при оптимизации по массе и объему для двухуровневого инвертора, выполненного на IGBT-транзисторах типа U.

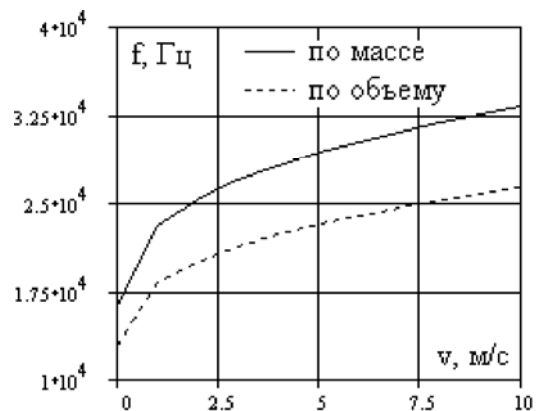


Рис. 3. Зависимость оптимальной частоты коммутации АИН от скорости воздушного потока

Следует отметить, что применение принудительного охлаждения, несмотря на повышение оптимальной частоты коммутации, большого выигрыша в массогабаритных показателях на практике не дает, так как установка дополнительных устройств (вентиляторов, датчиков скорости потока и т. п.) неизбежно ведет к повышению массы и объема инвертора, а также к усложнению его конструкции. Таким образом, для АИН мощностью (1–5) кВт, выполненных на интеллектуальных модулях, для упрощения конструкции можно рекомендовать использование естественного воздушного охлаждения.

Особый интерес представляет расчет оптимальной частоты при использовании различных типов IGBT-транзисторов. Результаты такого расчета представлены в табл. 1. При этом использованы удельные массогабаритные показатели из [3] и справочные данные, представленные в [5]. Расчеты выполнены для инвертора мощностью 2 кВт с выходным напряжением 220 В.

Таблица 1. Оптимальные частоты коммутации инвертора

Тип IGBT	Предельная частота, кГц	Оптимальная частота, кГц		
		По установленной мощности	По массе	По объему
S	до 1	40,1	12,2	9,7
F	5	45,6	13,7	9,9
U	10–15	46,4	14,0	10,8
K	15	47,8	14,4	11,4
W	50	54,4	16,3	12,9

Сравнивая полученные расчетным путем оптимальные значения частоты коммутации АИН с предельными частотами транзисторов, можно сделать следующие выводы:

*Розглянуто вплив частоти комутації автономного інвертора напруги, який побудовано на IGBT-транзисторах, на встановлену потужність його елементів. Подано рекомендації з вибору частоти для дворівневого автономного інвертора середньої потужності.*

*Influence of switching frequency on the rated power of the voltage-source building on IGBT inverter's elements is considered. Recommendations on the choice of switching frequency for the two-level voltage-source inverter with middle rated power are given.*

1. При использовании приборов S и F-типа массогабаритные показатели инвертора будут завышенными, так как для данных транзисторов оптимальная частота оказывается выше максимально допустимой. Применение таких приборов может быть оправдано лишь в инверторах невысокой стоимости и без жестких требований к габаритам и качеству выходного напряжения.

2. Использование IGBT-транзистора типа U, K или W характеризуется примерно одинаковой оптимальной частотой коммутации (от 10 до 16 кГц), что объясняется быстрым снижением массогабаритных показателей реактивных элементов АИН с возрастанием частоты. В таком случае дополнительным критерием выбора типа приборов может стать КПД инвертора.

### Перечень ссылок

1. Онищенко Г. Б., Локтева И. Л. Асинхронные вентиляционные каскады и двигатели двойного питания. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
2. Высокочастотные транзисторные преобразователи. / Э. М. Ромаш, Ю. И. Дравович, Н. Н. Юрченко, П. Н. Шевченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
3. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
4. Семенов В. В., Стрункин Г. Н., Попов С. А. Потери в инверторах с одно- и двуполярной ШИМ. // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 25–28.
5. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом Додека-XXI, 2001. – 384 с.
6. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 416 с.

*Поступила в редакцию 16.10.07 г.*

*После доработки 31.10.07 г.*