

кВт при частоте тока 50 Гц и частоте вращения 3000 об/мин показала, что суммарная масса АГ совместно с устройством для возбуждения в 1,3 - 1,4 раза ниже, чем у СГ. При сравнении с бесконтактными СГ (например, индукторными) масса АГ оказывается примерно в 2 - 3 раза меньше [2].

Кроме указанных выше, АГ в сравнении с СГ имеют следующие преимущества:

- при коротком замыкании в цепи нагрузки происходит потеря возбуждения АГ, в связи с чем не требуется защита генератора и, следовательно, установка дополнительной аппаратуры; время восстановления напряжения после короткого замыкания не превышает 1 с. [5];

- при работе АГ на несимметричную нагрузку коротко-замкнутая стержневая система магнитосимметричного ротора выполняет роль демпферной обмотки, вследствие чего обеспечивается достаточно высокое качество вырабатываемой АГ электроэнергии и в несимметричных режимах;

- включение АГ на параллельную работу с сетью энергосистемы не требует сложной дополнительной аппаратуры. Даже при значительных рассогласованиях частот вращения роторов генераторов в системе устанавливается частота тока, равная среднему значению частот токов генераторов, включенных на параллельную работу. При этом конденсаторы воз-

буждения выполняют роль фильтров и способствуют исчезновению биений напряжений и длительных переходных процессов. Исследования параллельной работы АГ показали, что амплитуда обменных колебаний активной мощности примерно в 3 раза меньше, чем у СГ, а переходные процессы при повышении и уменьшении нагрузки практически отсутствуют [6].

В силу изложенных причин асинхронные генераторы можно рассматривать в качестве перспективных источников в системах с ограничениями по мощности потребителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.А. Асинхронные генераторы для гидроэлектрических станций небольшой мощности. - М.: Госэнергоиздат. 1948. 128 с.
2. Григораш О.В. Современное состояние и перспективы применения асинхронных генераторов в автономной энергетике / Промышленная энергетика. 1995. №3. С. 29-32.
3. Бояр-Созонович С.П. Асинхронные генераторы. Свойства и перспективы / Электротехника. 1990. №10. С. 55-59.
4. Торопцев Н.Д. Область применения асинхронных генераторов / Энергетик. 2004. №3. С. 31-34.
5. Григораш О.В. Асинхронные генераторы в системах автономного электроснабжения / Электротехника. 2002. №1. С. 30-33.
6. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы автономных систем. – М.: Знак. 1998. 289 с.

□ Авторы статьи:

Разгильдеев

Геннадий Иннокентьевич

- докт. техн. наук, проф. каф. электроснабжения горных и промышленных предприятий

Храмцов

Роман Анатольевич

- аспирант каф. электроснабжения горных и промышленных предприятий

**УДК 621.314.5:621.382.2/3: 621.3.017**

**П. Д. Гаврилов, Е. А Лир**

## ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ С ШИМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРАНЗИСТОРНЫХ МОДУЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Появление на отечественном рынке полупроводниковых модулей привело, наконец-то, и в нашей стране к широкому распространению управляемого электропривода переменного тока. При этом в качестве основного варианта силовой части преобразователя частоты (ПЧ) используется схема неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор напряжения с ШИМ (В-Ф-АИН-

ШИМ), что связано, видимо, с большой долей электропривода турбомашин (насосы, вентиляторы и компрессоры), для которых не требуется высокого быстродействия с обеспечением рекуперативного торможения.

В связи с тем, что основным параметром, определяющим надежность, энергетическую эффективность и массогабаритные показатели ПЧ, явля-

ется величина потерь, рассеиваемая в его силовых элементах, ее расчет является одной из основных задач, стоящих перед разработчиком. Необходимость определения потерь имеет две цели – проверка работоспособности ПЧ при максимальновозможных нагрузках (тепловой расчет) и определение КПД системы ПЧ-АД во всем диапазоне изменения нагрузки [5]. При этом встает вопрос о предоставлении производителями полупроводниковой продукции информации, необходимой для решения этих задач.

Так как указанный тип ПЧ, по сути, представляет собой два преобразователя, включенных последовательно (выпрямитель и инвертор), то и потери в них, в целях упрощения можно рассматривать раздельно.

Расчет потерь выпрямителя не представляет собой сколько-нибудь существенной проблемы, в то время как расчет потерь в инверторе – довольно интересная инженерная задача, что объясняется сравнительной сложностью процессов, происходящих в нем.

В качестве ключевого элемента в преобразователях частоты мощностью до сотен киловатт уже довольно длительное время лидером де-факто является биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT). Данный прибор изготавливается многими иностранными производителями (International Rectifier, Mitsubishi, Toshiba, Semikron, Infineon и др.) и отечественным Саранским заводом «Электровыпрямитель».

Довольно часто, информация, предоставляемая различными производителями в спецификациях (datasheet) на однотипные элементы имеет существенные различия, как по характеру, так и по объему. Так, например, зависимость максимально-допустимого тока нагрузки от частоты

коммутации при фиксированной скважности приводят фирмы International Rectifier, Infineon и «Электровыпрямитель», в то время как у остальных производителей ее нет. А ведь имея на руках такую характеристику можно приблизительно оценить возможность использования силовых модулей на необходимой частоте, вместо того, чтобы ориентироваться на «сухие» оценки их частотных свойств типа «standart», «fast», «ultra fast» и «warp» [4].

Кроме того, при работе с современными силовыми полупроводниковыми приборами необходимо учитывать особенности, характерные для приборов тех или иных производителей. Для этого, помимо спецификаций, необходима дополнительная информация, включающая рекомендации по режимам эксплуатации, обеспечению помехозащищенности, условиям монтажа и охлаждения. Из фирм, перечисленных выше, в достаточном объеме такую информацию, на наш взгляд, предоставляют лишь International Rectifier, Mitsubishi и Semikron. Поэтому далее будем рассматривать особенности использования силовых модулей только этих трех фирм.

Сравним перечень и объем информации, предоставляемый данными фирмами в спецификациях на однотипные модули полумостовой конфигурации, с заявленной максимальной токовой нагрузкой 100 А, максимальным блокируемым напряжением 1200 В, без встроенных схем защиты («не интеллектуальные» модули), принципиальная электрическая схема которых приведена на рис. 1. У International Rectifier таким модулем является GA100TS120U, у Mitsubishi – CM100DU-24F, а у Semikron – SKM100GB123D.

В табл.1 приведен перечень основных зависимостей, используемых для характеристики силовых модулей, их наличие и условия, при которых эти зависимости определялись для трех производителей.

В таблице используются следующие обозначения:

$I_{Load}$  – ток нагрузки;

$I_C$  – ток коллектора;

$f$  – частота коммутации транзисторов;

$\gamma$  – скважность импульсов управления;

$V_{CE}$  – напряжение коллектор-эмиттер;

$T_J$  – температура перехода;

$V_{GE}$  – напряжение затвор-эмиттер;

$pw$  – ширина импульса;

$V_{CC}$  – напряжение питания (напряжение между выводами C1 и E2);

$T_C$  – температура корпуса;

$Z_{thJC}$  – переходное тепловое сопротивление кристалл-корпус;

$C_{IES}$ ,  $C_{OES}$ ,  $C_{RES}$  – входная, обратная и прямая емкости, соответственно;

$Q_G$  – заряд затвора;

$t_f$ ,  $t_{d(off)}$ ,  $t_{d(on)}$ ,  $t_r$  – время;

$R_G$  – сопротивление резистора, включенного

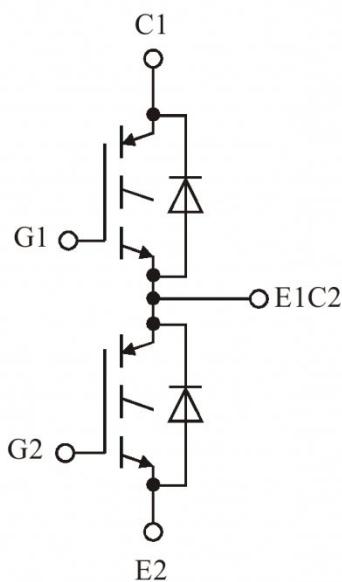


Рис. 1 . Принципиальная электрическая схема полумостового модуля

последовательно в цепь затвора;

$E_{SW}$  – коммутационная энергия;

$SOA$  – область безопасных режимов работы;

$I_E$  – ток эмиттера;

$E_{Diode\ OFF}$  – энергия отключения диода;

$Q_{RR}$  – заряд обратного восстановления;

$I_{RR}$  – ток обратного восстановления;

$t_{rr}$  – время обратного восстановления;

$P$  – рассеиваемая мощность.

Из таблицы ясно видно: мало того, что для однотипных модулей приводится различная информация, так одна и та же характеристика у раз-

ных фирм может определяться при различных условиях (например, характеристика  $V_{GE} = f(Q_G)$ ).

Разумеется, это не говорит о том, что использование модулей фирм, не предоставляющих те или иные характеристики, становится невозможным. Из всего вышесказанного можно сделать лишь вывод о том, что отсутствие единого подхода к нормам и объемам на предоставляемую информацию вынуждает разработчиков тратить большое количество времени на проведение адекватного сравнения продукции различных фирм.

Таблица 1

N	Имеющиеся зависимости	Наличие, условия измерений		
		IR	Mitsubishi	Semikron
1	$I_{Load} = f(f)$	полумост $\gamma = 50$ ; $T_J = 125^0\text{C}$	–	–
2	$I_C = f(V_{CE})$	$T_J = 25, 125^0\text{C}$ $V_{GE} = 15\text{ В}$ $pw = 80\text{ }\mu\text{s}$	$T_J = 25^0\text{C}$ $V_{GE} = 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 11, 15,$ $20\text{ В}$	$T_J = 25, 125^0\text{C}$ $pw = 80\text{ мкс}$ $V_{GE} = 7, 9, 11, 13, 15, 17\text{ В}$
3	$I_C = f(V_{GE})$	$T_J = 25, 125^0\text{C}$ $V_{CC} = 50\text{ В}; w = 5\text{ }\mu\text{s}$	–	$V_{CC} = 20\text{ В}$ $pw = 80\text{ мкс}$
4	$I_{C\ MAX} = f(T_C)$	$f = 0$	–	$T_J = 150^0\text{C}; V_{GE} \geq 15\text{ В}$
5	$V_{CE} = f(I_C)$	–	$T_J = 25, 125^0\text{C}; V_{GE} = 15\text{ В}$	–
6	$V_{CE} = f(V_{GE})$	–	$T_J = 25^0\text{C}$ $I_C = 40, 100, 200\text{ A}$	–
7	$V_{CE} = f(T_J)$	$I_C = 50, 100, 200\text{ A}$ $V_{GE} = 15\text{ В}; pw = 80\text{ }\mu\text{s}$	–	–
8	$Z_{thJC} = f(pw)$	$\gamma = 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02,$ $0.01.$	одиночный импульс $T_C = 25^0\text{C}$	$\gamma = 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02,$ $0.01, 0.$
9	$V_{GE} = f(Q_G)$	–	$I_C = 100\text{ A}$ $V_{CC} = 400, 600\text{ В}$	одиночный импульс $I_C = 75\text{ A}; V_{CC} = 600, 800\text{ В}$
10	$C_{IES}, C_{OES}, C_{RES} = f(V_{CE})$	$f = 1\text{ МГц}$	$V_{GE} = 0$	$V_{GE} = 0$ $f = 1\text{ МГц}$
11	$V_{GE} = f(Q_G)$	$V_{CC} = 400\text{ В}$ $I_C = 113\text{ A}$	–	–
12	$t_f, t_{d(off)}, t_{d(on)}, t_r = f(I_C)$	–	$V_{CC} = 600\text{ В}; V_{GE} = \pm 15\text{ В}$ $R_G = 3.1\text{ Ом}; T_J = 125^0\text{C}$ индуктивная нагрузка	$V_{CC} = 600\text{ В}; V_{GE} = \pm 15\text{ В}$ $R_{G1} = 15\text{ Ом}; G_2 = 15\text{ Ом}$ $T_J = 125^0\text{C}$ индуктивная нагрузка
13	$t_f, t_{d(off)}, t_{d(on)}, t_r = f(R_G)$	–	–	$V_{CC} = 600\text{ В}; V_{GE} = \pm 15\text{ В}$ $I_C = 75\text{ A}; T_J = 125^0\text{C}$ индуктивная нагрузка
14	$E_{SW} = f(R_G)$	$V_{CC} = 720\text{ В}; V_{GE} = 15\text{ В}$ $T_J = 125^0\text{C}; I_C = 113\text{ A}$	–	$V_{CC} = 600\text{ В}; V_{GE} = \pm 15\text{ В}$ $T_J = 125^0\text{C}; I_C = 75\text{ A}$
15	$ESW = f(T_J)$	$IC = 50, 100, 200\text{ A}$ $VCC = 720\text{ В}; VGE = 15\text{ В}$ $RG1 = 15\text{ Ом}; RG2 = 0\text{ Ом.}$	–	–
16	$ESW = f(IC)$	$VCC = 720\text{ В}; VGE = 15\text{ В}$ $TJ = 1250\text{ C}; RG1 = 15\text{ Ом}$ $RG2 = 0\text{ Ом}$	–	$VCC = 600\text{ В}; VGE = \pm 15\text{ В}$ $TJ = 1250\text{ C}; RG = 15\text{ Ом}$
17	$SOA$ $IC = f(VCE)$	–	–	одиночный импульс $pw = 0.021, 0.1, 1, 10\text{ мс}$ $TC = 250\text{ C}; TJ \leq 1500\text{ C}$
18	$RBSOA$ $IC = f(VCE)$	$VGE = 20\text{ В}$ $TJ = 1250\text{ C}$	–	$VGE = 15\text{ В}; TJ \leq 1500\text{ C}$ $RG2 = 15\text{ Ом}; IC = 75\text{ A}$
19	$SOA$ при К.З. $IC K3 / IC = f(VCE)$	–	–	$VGE = 15\text{ В}; TJ \leq 1500\text{ C}$ $pw = 10\text{ мкс}; L < 25\text{ нГн}$ $RG2 = 15\text{ Ом}; IC = 75\text{ A}$
20	$IE = f(VEC)$	$TJ = 125, 250\text{ C}$	$TJ = 250\text{ C}$	$TJ = 125, 250\text{ C}$

21	$E_{\text{Diode OFF}} = f(I_C)$	—	—	одиночный импульс $R_G = 6, 9, 12, 20, 60 \Omega$
22	$Q_{RR} = f(dI/dt)$	$V_{CC} = 720 \text{ В}$ $T_J = 125, 25^\circ \text{C}$ $I_F = 50, 100, 200 \text{ A}$	—	$V_{CC} = 600 \text{ В}$ $T_J = 125^\circ \text{C}$ $I_F = 19, 38, 56, 75, 100 \text{ A}$ $R_G = 6, 9, 12, 20, 60 \Omega$
23	$I_{RR} = f(I_E)$	—	$V_{CC} = 600 \text{ В}; T = 25^\circ \text{C}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}; R_G = 3.1 \Omega$ индуктивная нагрузка	$V_{CC} = 600 \text{ В}; T = 125^\circ \text{C}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}$ $R_G = 6, 9, 12, 20, 60 \Omega$
24	$t_{rr} = f(I_E)$	—	$V_{CE} = 600 \text{ В}; T = 25^\circ \text{C}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}; R_G = 3.1 \Omega$ индуктивная нагрузка	—
25	$t_{rr} = f(dI/dt)$	$V_{CE} = 720 \text{ В}$ $T = 125, 25^\circ \text{C}$ $I_F = 50, 100, 200 \text{ A}$	—	
26	$I_{RRM} = f(dI/dt)$	$V_{CC} = 720 \text{ В}$ $T = 125, 25^\circ \text{C}$ $I_F = 50, 100, 200 \text{ A}$	—	$V_{CC} = 600 \text{ В}; T = 125^\circ \text{C}$ $I_F = 75 \text{ A}$ $R_G = 6, 9, 12, 20, 60 \Omega$
27	$P = f(T_C)$	—	—	+

Теперь рассмотрим непосредственно те проблемы, которые возникают при попытке определения потерь.

В любой момент времени энергия, рассеиваемая в силовом полупроводниковом приборе может быть получена из выражения [1,2,6,7]:

$$E = \int_0^t u(i) \cdot i(t) dt,$$

где  $t$  – время импульса. Мощность может быть получена умножением энергии на частоту.

К сожалению, нельзя найти простое аналитическое выражение для функций напряжения и тока (типовые диаграммы тока и напряжений транзистора при «жесткой» коммутации приведены на рис. 2). Поэтому при расчете пользуются рядом допущений и упрощений.

В основу большинства алгоритмов расчета потерь в транзисторном инверторе (в том числе и в алгоритмах International Rectifier, Mitsubishi и Semikron) положен принцип разделения статических и динамических потерь. Потери на управление при этом не учитываются, вследствие их малости. Кроме того, не учитываются и статические потери в закрытом состоянии, так как в существующих полупроводниковых ключевых элементах токи утечки в закрытом состоянии пренебрежимо малы. Максимальные значения токов утечки си-

ловых модулей трех фирм, соответствующие им значения потерь в закрытом состоянии, максимально допустимая мощность, рассеиваемая на коллекторе при температуре корпуса  $25^\circ \text{C}$  и величина потерь в закрытом состоянии в процентах от максимально допустимой мощности приведены в табл. 2 [8 – 10].

Таким образом, максимальная погрешность, возникающая при пренебрежении потерями в закрытом состоянии, при использовании рассмотренных типов модулей, составляет 2,308%. Поскольку реально модули работают при меньших уровнях напряжения (и, соответственно, меньших токах утечки), то и реальная погрешность, вносимая указанным допущением, будет меньше.

К сожалению, в спецификации нет данных о величинах токов утечки обратных диодов.

Таким образом, расчет сводится к, казалось бы, простому определению статических и динамических потерь. Но и здесь возникают определенные трудности. Три фирмы, рассматриваемые нами, рекомендуют использовать три различные формулы.

IR:

$$E = \int_0^{t_f} \left( U_t \cdot I_C \cdot \sin \omega t + a \cdot I_C^{(b+1)} \cdot \sin^{(b+1)} \omega t \right) dt$$

где  $I_C$  – амплитудное значение синусоидального

Таблица 2

Тип модуля	Фирма	Ток утечки, макс	Условия измерения	Потери	$P_{C \text{ MAX}}$	%
GA100TS120U	IR	10 mA	$U_{GE} = 0$ $U_{CE} = 1200 \text{ В}$ $T_J = 125^\circ \text{C}$	12 Вт	520 Вт	2,308
SKM100GB123D	Semikron	6 mA	$U_{GE} = 0$ $U_{CE} = 1200 \text{ В}$ $T_J = 125^\circ \text{C}$	7,2 Вт	690 Вт	1,044
CM100DU-24F	Mitsubishi	1 mA	$U_{GE} = 0$ $U_{CE} = 1200 \text{ В}$	1,2 Вт	500 Вт	0,24

тока,

$U_t$  – пороговое значение падения напряжения коллектор-эмиттер,

$a, b$  – коэффициенты, используемые для аппроксимации вольтамперной характеристики транзистора.

Mitsubishi:

$$\begin{aligned} P_{SS} &= I_C V_{CE(SAT)} \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin^2 x \cdot \frac{1 + \sin(x + \theta) \cdot D}{2} dx = \\ &= I_C \cdot V_{CE(SAT)} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cdot \cos \theta \right), \end{aligned}$$

где  $\theta$  – угол между напряжением и током нагрузки,

$U_{CE(SAT)}$  – напряжение насыщения транзистора.

$D$  – глубина модуляции.

Semikron:

$$\begin{aligned} P_{fw/TI} &= \left( \frac{1}{2} - \frac{t_{dead}}{T_S} \right) \cdot \left( \frac{a}{\pi} \cdot i + \frac{b}{4} \cdot i^2 \right) + \\ &+ m \cdot \cos \varphi \cdot \left( \frac{a}{8} \cdot i + \frac{b}{3\pi} \cdot i^2 \right), \end{aligned}$$

где  $t_{dead}$  – «мертвое» время,

$T_S$  – период коммутации,

то есть, в одних случаях учитывается ВАХ транзистора (IR и Semikron), в других – нет (Mitsubishi). Где-то в расчет принимается влияние длительности «мертвого» времени (Semikron), а где-то нет. Получается, что при сопоставлении формул, рекомендуемых к использованию для расчета статических потерь, опять встает вопрос об адекватном сравнении результатов, получае-

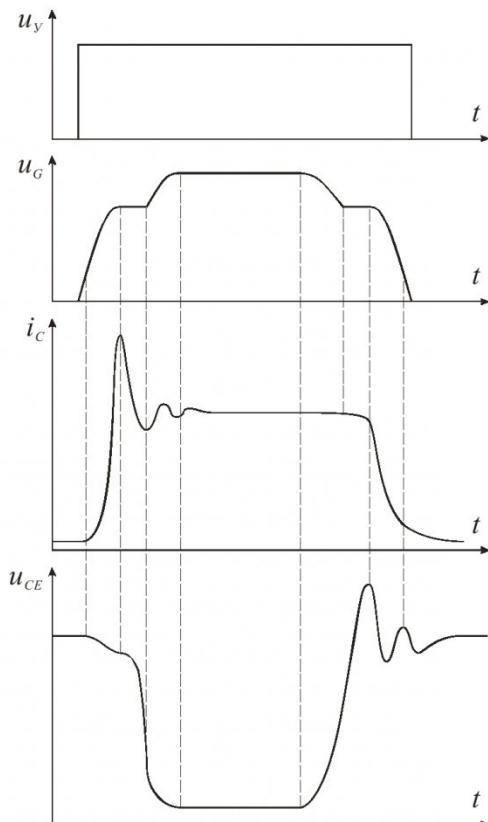


Рис. 2. Типовые диаграммы напряжений и тока IGBT при «жесткой» коммутации

мых по той или иной формуле.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2001. – 384 с.
2. «Application Notes AN-990» International Rectifier, 1995, [www.irf.com](http://www.irf.com).
3. Колпаков А. И. Особенности теплового расчета импульсных силовых каскадов. Электронные компоненты №2, 2000.
4. Семенов Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов, Солон-Р, 2001, 327 с.
5. Гаврилов П. Д., Лир Е. А., Неверов А. А. Проблемы ресурсо- и энергосбережения. Вестн. КузГТУ. 2004. №1.
6. Application Manual Power Modules, [www.semikron.com](http://www.semikron.com).
7. General Considerations for IGBT and IPM. Mitsubishi Application Notes, 1998, [www.mitsubishichips.com](http://www.mitsubishichips.com).
8. GA100TS120U, datasheet, [www.irf.com](http://www.irf.com).
9. CM100DU-24F, datasheet, [www.mitsubishichips.com](http://www.mitsubishichips.com).
10. SKM100GB123D, datasheet, [www.semikron.com](http://www.semikron.com).

□ Авторы статьи:

Гаврилов

Петр Данилович

- канд. техн. наук, доцент каф. элек-  
тропривода и автоматизации

Лир

Евгений Александрович

- аспирант каф. элек-  
тропривода и автоматизации