

Диодно-тиристорные модули компании «Электровыпрямитель»









Андрей ДРУЖИНИН
Вячеслав МАТВЕЕВ
Татьяна СЕРГУНИНА
Ирина МОСКАЛЕВА
Галина ВАРЯНОВА
Юлия ДЕМИДОВА
Ольга ПРИКАЗЧИКОВА
Наталья КРАСНОЩЕКОВА
nicspp@elvpr.ru

Статья продолжает цикл публикаций об отечественной компонентной базе силовой полупроводниковой электроники производства компании ПАО «Электровыпрямитель», начатый на страницах данного журнала [1]. Представлен обзор силовых беспотенциальных модулей прижимной конструкции на основе низкочастотных тиристоров и выпрямительных диодов, а также ряд новых разработок модулей, в том числе с потенциальным основанием.

Введение

Развитие модульной конструкции приборов силовой электроники определено постоянно возрастающими параметрами преобразовательного оборудования, их мощностью и степенью интеграции. Модульное исполнение весьма привлекательно, поскольку позволяет организовать простые и компактные решения при проектировании современных преобразовательных устройств для различных сфер применения в промышленности, энергетике и транспорте. Современный рынок представлен широким спектром потенциальных и беспотенциальных диодно-тиристорных модулей от отечественных, европейских и азиатских производителей. Конструктивно применение беспотенциальных модулей имеет ряд неоспоримых преимуществ: изолированное основание модулей от потенциальных контактов; упрощенный монтаж и ошиновка силовых схем, меньшая стоимость эксплуатации по сравнению с комплектами приборов таблеточного исполнения. Несмотря на то что конструкция диодно-тиристорных модулей с изолированным основанием предполагает только одностороннее охлаждение, построение схем с помощью модулей становится все более эффективным. При изготовлении беспотенциальных модулей производителями преимущественно применяются две

Таблица 1. Конструктивный ряд серийно выпускаемых модулей

| | Корпус | | | |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | MTD1 | MTD2 | MTD3 | MTD4 |
| |  |  |  |  |
| Ширина основания, мм | 20 | 34 | 50 | 50 |
| Ток, А | 40–80 | 100–200 | 125–320 | 250–630 |
| Напряжение, В | 400–1800 | 400–3200 | 400–3200 | 1200–4000 |
| | Корпус | | | |
| | MTD5 | MTD6 | MTD7 | MTD8 |
| |  |  |  |  |
| Ширина основания, мм | 60 | 70 | 77 | 90 |
| Ток, А | 500–1000 | 500–1000 | 400–1000 | 630–2000 |
| Напряжение, В | 1200–4000 | 1200–4400 | 1200–4400 | 1200–4400 |

различные технологии: паяная и прижимная. Технология прижимного контакта полупроводниковых элементов в конструкции модуля обеспечивает им надежность в режиме больших токовых нагрузок и длительную безотказную работу в циклическом режиме эксплуатации. Модули прижимной конструкции имеют лучшие показатели термостойкости и стойкости к механическим

воздействиям, но по сравнению с модулями паяной конструкции материалоемкость и трудоемкость их изготовления выше. Технология паяных контактов в основном используется в конструкции модулей малой мощности, комплектуемых чипами диодов и тиристоров, изготовленных по планарной технологии. В рамках статьи рассмотрены отечественные беспотенциальные диодно-

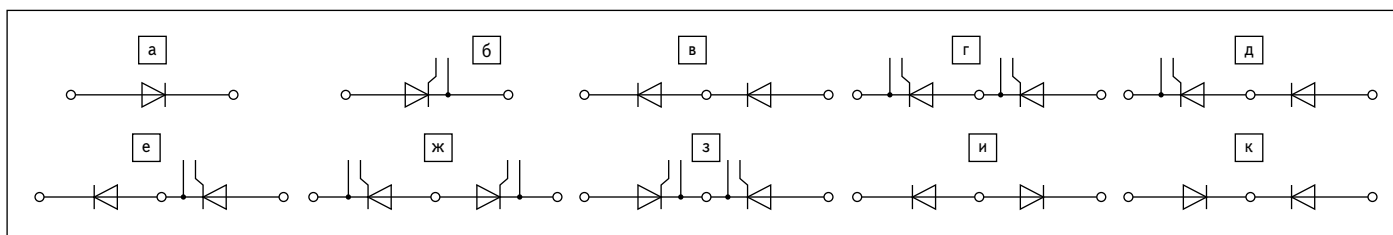


Рис. 1. Варианты реализации электрических схем соединения модулей:

а) модули типа М1Д, М1ДЛ; б) модули типа М1Т; в) модули типа М2Д, М2ДД; г) модули типа М2Т, М2ТТ; д) модули типа М2ДТ; е) модули типа М2ТА, М2ТАА; з) модули типа М2ТК, М2ТТК; и) модули типа М2ДА, М2ДАА; к) модули типа М2ДК, М2ДТК

Таблица 2. Модули диодные выпрямительные

| Тип | V _{RRM} | I _{F(AV)} | I _{FSM} | V _{TO} | r _T | R _{th(j-c)} | T _{jmax} | V _{isol} | Корпус |
|------------------------|------------------|---------------------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------|
| | | (T _C °C) | t _p = 10 мс | T _{jmax} | T _{jmax} | | | | |
| | В | А | кА | В | мОм | °C/Вт | °C | В | |
| Основание 20 мм | | | | | | | | | |
| МДД-40 | 400–1800 | 40 (100) | 1,2 | 1 | 3,8 | 0,68 | 140 | 2500 | MTD1 |
| МДД-63 | 400–1800 | 63 (100) | 1,6 | 0,95 | 2,7 | 0,46 | 140 | 2500 | |
| МДД-80 | 400–1800 | 80 (90) | 2 | 0,95 | 1,6 | 0,45 | 140 | 2500 | |
| Основание 34 мм | | | | | | | | | |
| М2Д-160 | 2400–3200 | 180 (85) | 5,5 | 0,85 | 0,85 | 0,18 | 125 | 3000 | MTD2 |
| М2Д-200 | 1200–2200 | 211 (85) | 7 | 0,77 | 0,54 | 0,18 | 125 | 2500 | |
| МДД-125 | 400–1600 | 125 (92) | 5 | 0,9 | 0,65 | 0,19 | 125 | 2500 | |
| МДД-160 | 400–1600 | 160 (89) | 6 | 0,9 | 0,55 | 0,18 | 125 | 2500 | |
| Основание 50 мм | | | | | | | | | |
| М2Д-250 | 2600–3200 | 286 (85) | 9 | 0,85 | 0,38 | 0,125 | 125 | 3000 | MTD3 |
| МДД-320 | 1200–2400 | 330 (100) | 8,3 | 0,84 | 0,45 | 0,125 | 150 | 3000 | |
| МДД-200 | 400–1600 | 200 (89) | 7 | 0,9 | 0,6 | 0,13 | 125 | 2500 | |
| МДД-250 | 400–1600 | 250 (85) | 11 | 0,9 | 0,56 | 0,12 | 125 | 2500 | MTD4 |
| М1Д-400 | 3400–4000 | 530 (85) | 12 | 0,9 | 0,46 | 0,068 | 140 | 3000 | |
| М1Д-500 | 2400–3200 | 705 (85) | 15 | 0,85 | 0,29 | 0,068 | 150 | 3000 | |
| М1Д-630 | 1200–2200 | 830 (85) | 19 | 0,77 | 0,18 | 0,068 | 150 | 2500 | |
| М1Д-400 | 1900–2800 | 600 (85) | 18 | 0,9 | 0,3 | 0,068 | 140 | 3000 | MTD4 |
| М1Д-500 | 1300–2600 | 730 (85) | 20 | 0,85 | 0,25 | 0,068 | 150 | 3000 | |
| М1Д-630 | 200–1200 | 850 (85) | 24 | 0,8 | 0,15 | 0,068 | 150 | 2500 | |

| Тип | V _{RRM} | I _{F(AV)} | I _{FSM} | V _{TO} | r _T | R _{th(j-c)} | T _{jmax} | V _{isol} | Корпус |
|------------------------|------------------|---------------------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------|
| | | (T _C °C) | t _p = 10 мс | T _{jmax} | T _{jmax} | | | | |
| | В | А | кА | В | мОм | °C/Вт | °C | В | |
| М1ДЛ-400 | 2800–4000 | 400 (77) | 12 | 1 | 0,77 | 0,09 | 140 | 9500 | MTD4-1 |
| М2Д1-400 | 3400–4000 | 530 (85) | 12 | 0,9 | 0,46 | 0,068 | 140 | 3000 | |
| М2Д1-500 | 2400–3200 | 705 (85) | 15 | 0,85 | 0,29 | 0,068 | 150 | 3000 | MTD5 |
| Основание 60 мм | | | | | | | | | |
| М2Д1-630 | 1200–2200 (85) | 830 | 19 | 0,77 | 0,18 | 0,068 | 150 | 2500 | MTD5 |
| М2Д-400 | 1900–2800 (85) | 600 | 18 | 0,9 | 0,3 | 0,068 | 140 | 3000 | |
| М2Д-500 | 1300–2600 (85) | 730 | 20 | 0,85 | 0,25 | 0,068 | 150 | 3000 | |
| М2Д-630 | 200–1200 (85) | 850 | 24 | 0,8 | 0,15 | 0,068 | 150 | 2500 | |
| Основание 70 мм | | | | | | | | | |
| М1Д2-630 | 2900–4400 | 920 (85) | 20 | 1 | 0,3 | 0,042 | 150 | 3000 | MTD6 |
| М1Д-800 | 1900–2800 | 1110 (85) | 28 | 0,9 | 0,18 | 0,042 | 150 | 3000 | |
| М1Д-1000 | 400–1800 | 1260 (85) | 32 | 0,85 | 0,12 | 0,042 | 150 | 3000 | |
| Основание 77 мм | | | | | | | | | |
| М2Д2-630 | 2900–4400 | 760 (100) | 20 | 1 | 0,3 | 0,042 | 150 | 3500 | MTD7 |
| М2Д2-800 | 1900–2800 | 910 (100) | 28 | 0,9 | 0,18 | 0,042 | 150 | 3000 | |
| М2Д2-1000 | 400–1800 | 1030 (100) | 32 | 0,85 | 0,12 | 0,042 | 150 | 3000 | |
| Основание 90 мм | | | | | | | | | |
| М1Д-1250 | 3400–4400 | 1250 (96) | 35 | 0,9 | 0,2 | 0,028 | 150 | 4000 | MTD8 |
| М1Д-1600 | 2400–3400 | 1600 (96) | 45 | 0,85 | 0,09 | 0,028 | 150 | 4000 | |
| М1Д-2000 | 1200–2400 | 2000 (83) | 55 | 0,82 | 0,075 | 0,028 | 150 | 4000 | |

| М | ТД | 2 | - 1000 | - 12 | - 7 | Н2 | МТД2-1000-12-7Н2 |
|-----------|-------|-----------|---------|-------|------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| М | | | | | | | модуль |
| нет знака | ТТ | | | | | | два тиристора низкочастотных |
| | ТД | | | | | | тиристор низкочастотный и диод выпрямительный |
| | ДТ | | | | | | диод выпрямительный и тиристор низкочастотный |
| | ТБТБ | | | | | | два тиристора быстродействующих |
| | ТБДЧ | | | | | | тиристор быстродействующий и диод быстросовосстанавливающийся |
| | ДЧТБ | | | | | | диод быстросовосстанавливающийся и тиристор быстродействующий |
| | ТБИДЧ | | | | | | тиристор быстродействующий частотно-импульсный и диод быстросовосстанавливающийся |
| | ДЧТБИ | | | | | | диод быстросовосстанавливающийся и тиристор быстродействующий частотно-импульсный |
| | ТСТС | | | | | | два симистора |
| 1 | Т | | | | | | одиночный тиристор низкочастотный |
| | ТБ | | | | | | одиночный тиристор быстродействующий |
| | ТБИ | | | | | | одиночный тиристор быстродействующий частотно-импульсный |
| | ТС | | | | | | одиночный симистор |
| 2 | Т | | | | | | два тиристора низкочастотных |
| | ТБ | | | | | | два тиристора быстродействующих |
| | ТБИ | | | | | | дватиристора быстродействующих частотно-импульсных |
| | ТОТО | | | | | | два оптотиристора |
| | | 1,2,... | | | | | модификация модуля |
| | | нет знака | | | | | полумост |
| | | А | | | | | схема с общим анодом |
| | | К | | | | | схема с общим катодом |
| | | | 50 | | | | максимально допустимый ток в открытом состоянии, А |
| а | | | | 12 | | | класс по повторяющемуся импульсному напряжению, В/100 |
| | | | | | 7 | | группа по скорости нарастания напряжения (dv ₀ /dt) _{cr} |
| | | | | | | Н2 | группа по времени выключения t _q |
| | | | | | | 2 | группа по времени включения t _{on} (для модулей быстродействующих) |
| | | | | | | - ОВ | модуль со встроенным жидкостным охлаждением |
| М | 1 | Д | 1 | - 400 | - 40 | М1Д1-400-40 | |
| М | | | | | | | модуль |
| нет знака | Д | | | | | | одиночный диод выпрямительный |
| | ДД | | | | | | два диода быстросовосстанавливающихся |
| | ДЧДЧ | | | | | | два диода быстросовосстанавливающихся |
| 1 | Д | | | | | | одиночный диод выпрямительный |
| | ДЧ | | | | | | одиночный диод быстросовосстанавливающийся |
| 2 | Д | | | | | | два диода быстросовосстанавливающихся |
| | ДЧ | | | | | | два диода быстросовосстанавливающихся |
| 4 | Д | | | | | | 4 диода (однофазный мост) |
| 6 | Д | | | | | | 6 диодов (трехфазный мост) |
| | | | 1,2,... | | | | модификация модуля |
| | | | А | | | | схема с общим анодом |
| | | | К | | | | схема с общим катодом |
| | | | | 400 | | | максимально допустимый прямой ток, А |
| | | | | | 40 | | класс по повторяющемуся импульсному напряжению, В/100 |
| | | | | | | 3 | группа по времени обратного восстановления (для модулей быстросовосстанавливающихся) |

Рис. 2. Расшифровка условного обозначения модулей: а) МТД2-1000-12-7Н2; б) М1 Д1-400-40

Таблица 3. Модули тиристорные низкочастотные

| Тип | V_{DRM} V_{RRM} | $I_{T(AV)}$ | I_{TSM} | $V_{T(TO)}$ | r_T | $(di_T/dt)_{cr}$ | $(dv_D/dt)_{cr}$ | t_q | $R_{th(j-c)}$ | T_{jmax} | V_{isol} | Корпус |
|-----------------|------------------------|---------------|--------------|-------------|------------|------------------|------------------|-------|---------------|------------|------------|--------|
| | | (T_C , °C) | $t_p = 10мс$ | T_{jmax} | T_{jmax} | T_{jmax} | T_{jmax} | тип. | | | | |
| Основание 20 мм | | | | | | | | | | | | |
| MTT-40 | 400–600 | 40 (85) | 0,8 | 1 | 3,8 | 200 | 500, 1000 | 100 | 0,68 | 125 | 2500 | MTD1 |
| MTT-63 | 400–1600 | 63 (85) | 1,2 | 0,94 | 2,8 | 200 | 500, 1000 | 125 | 0,46 | 125 | 2500 | |
| MTT-80 | 400–1200 | 80 (75) | 1,6 | 0,9 | 2 | 200 | 500, 1000 | 160 | 0,45 | 125 | 2500 | |
| Основание 34 мм | | | | | | | | | | | | |
| M2T-100 | 2600–3200 | 116 (85) | 3,5 | 1,15 | 2,6 | 200 | 1000 | 320 | 0,18 | 125 | 2500 | MTD2 |
| M2T-125 | 1800–2400 | 140 (85) | 4 | 1,05 | 1,5 | 200 | 1000 | 250 | 0,18 | 125 | 2500 | |
| M2T-200 | 400–1200 | 218 (85) | 5,5 | 0,83 | 0,58 | 200 | 1000 | 125 | 0,18 | 130 | 2500 | |
| MTT-100 | 400–1600 | 100 (85) | 2,5 | 1,15 | 2,4 | 200 | 1000 | 160 | 0,22 | 125 | 2500 | |
| MTT-125 | 400–1600 | 125 (85) | 3 | 1,1 | 1,8 | 200 | 1000 | 200 | 0,19 | 125 | 2500 | |
| MTT-160 | 400–1600 | 160 (85) | 4,5 | 1 | 1,05 | 200 | 1000 | 200 | 0,18 | 125 | 2500 | |
| MTT-200 | 600–1400 | 200 (73) | 5 | 0,95 | 1,25 | 500 | 1000 | 125 | 0,18 | 130 | 2500 | |
| Основание 50 мм | | | | | | | | | | | | |
| M2T1-160 | 2600–3200 | 175 (85) | 5 | 1,15 | 1,5 | 200 | 1000 | 320 | 0,125 | 125 | 3000 | MTD3 |
| M2T1-200 | 1800–2400 | 210 (85) | 7 | 1,05 | 0,85 | 200 | 1000 | 250 | 0,125 | 125 | 3000 | |
| M2T-250 | 1200–1800 | 280 (85) | 9 | 0,95 | 0,5 | 200 | 1000 | 160 | 0,125 | 130 | 3000 | |
| M2T1-320 | 600–1200 | 375 (85) | 12 | 0,85 | 0,35 | 200 | 1000 | 125 | 0,125 | 140 | 3000 | |
| MTT-200 | 400–1600 | 200 (85) | 6 | 1,05 | 0,95 | 200 | 1000 | 160 | 0,130 | 125 | 3000 | |
| MTT-250 | 400–1600 | 250 (85) | 9 | 1,05 | 0,53 | 200 | 1000 | 160 | 0,125 | 125 | 3000 | |
| M1T-250 | 3400–4000 | 300 (85) | 6 | 1,2 | 1 | 200 | 1000 | 400 | 0,068 | 125 | 3000 | MTD4 |
| M1T-320 | 2600–3200 | 357 (85) | 10 | 1 | 0,735 | 200 | 1000 | 320 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| M1T1-400 | 2000–2400 | 407 (85) | 11 | 1,02 | 0,42 | 200 | 1000 | 250 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| M1T1-500 | 800–1800 | 500 (85) | 14 | 0,95 | 0,3 | 200 | 1000 | 160 | 0,068 | 130 | 3000 | |
| M1T-400 | 1300–1800 | 460 (85) | 13 | 0,92 | 0,32 | 200 | 1000 | 160 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| M1T-500 | 400–1200 | 545 (85) | 14 | 0,85 | 0,27 | 200 | 1000 | 125 | 0,068 | 130 | 3000 | |
| M1T-630 | 400–1200 | 660 (85) | 17 | 0,81 | 0,25 | 200 | 1000 | 125 | 0,068 | 140 | 3000 | |
| Основание 60 мм | | | | | | | | | | | | |
| M2T1-250 | 3000–4000 | 300 (85) | 6 | 1,2 | 1 | 200 | 1000 | 400 | 0,068 | 125 | 3000 | MTD5 |
| M2T-320 | 2600–3200 | 357 (85) | 10 | 1 | 0,735 | 200 | 1000 | 320 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| M2T1-400 | 2000–2400 | 407 (85) | 11 | 1,02 | 0,42 | 200 | 1000 | 250 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| M2T-400 | 1300–1800 | 460 (85) | 13 | 0,92 | 0,32 | 200 | 1000 | 200 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| M2T1-500 | 800–1800 | 500 (85) | 14 | 0,95 | 0,3 | 200 | 1000 | 200 | 0,068 | 130 | 3000 | |
| M2T-500 | 200–1200 | 545 (85) | 14 | 0,85 | 0,27 | 200 | 1000 | 125 | 0,068 | 130 | 3000 | |
| M2T-630 | 400–1200 | 660 (85) | 17 | 0,81 | 0,25 | 200 | 1000 | 125 | 0,068 | 140 | 3000 | |
| Основание 70 мм | | | | | | | | | | | | |
| M1T2-400 | 3600–4000 | 492 (85) | 15 | 1,18 | 0,62 | 200 | 1000 | 400 | 0,042 | 125 | 2500 | MTD6 |
| M1T2-500 | 2900–3400 | 570 (85) | 18 | 1,1 | 0,4 | 200 | 1000 | 320 | 0,042 | 125 | 2500 | |
| M1T2-630 | 1900–2800 | 660 (80) | 20 | 1,05 | 0,35 | 200 | 1000 | 320 | 0,042 | 125 | 2500 | |
| M1T-800 | 1300–1800 | 840 (80) | 23 | 1 | 0,2 | 200 | 1000 | 200 | 0,042 | 130 | 2500 | |
| M1T-1000 | 400–1200 | 1020 (85) | 28 | 0,9 | 0,15 | 200 | 1000 | 160 | 0,042 | 140 | 2500 | |
| M1T1-1250 | 400–800 | 1335 (85) | 30 | 0,83 | 0,1 | 200 | 1000 | 100 | 0,042 | 150 | 2500 | |
| Основание 77 мм | | | | | | | | | | | | |
| M2T2-400 | 3600–4000 | 492 (85) | 15 | 1,18 | 0,62 | 200 | 1000 | 400 | 0,042 | 125 | 3500 | MTD7 |
| M2T2-500 | 2900–3400 | 570 (85) | 18 | 1,1 | 0,4 | 200 | 1000 | 320 | 0,042 | 125 | 3500 | |
| M2T2-630 | 1900–2800 | 660 (80) | 20 | 1,05 | 0,35 | 200 | 1000 | 320 | 0,042 | 125 | 3000 | |
| M2T2-800 | 1300–1800 | 840 (80) | 23 | 1 | 0,2 | 200 | 1000 | 200 | 0,042 | 130 | 3000 | |
| M2T2-1000 | 400–1200 | 1035 (85) | 28 | 0,9 | 0,15 | 200 | 1000 | 160 | 0,042 | 140 | 3000 | |
| M2T2-1250 | 400–800 | 1335 (85) | 30 | 0,83 | 0,1 | 200 | 1000 | 125 | 0,042 | 150 | 3000 | |
| Основание 90 мм | | | | | | | | | | | | |
| M1T-1600 | 200–1200 | 1610 (85) | 60 | 0,85 | 0,064 | 200 | 1000 | 200 | 0,028 | 135 | 4000 | MTD8 |
| M1T-1250 | 1200–1800 | 1400 (85) | 49 | 0,9 | 0,07 | 200 | 1000 | 250 | 0,028 | 130 | 4000 | |
| M1T2-1000 | 1800–2400 | 1110 (85) | 42 | 0,9 | 0,14 | 200 | 1000 | 320 | 0,028 | 125 | 4000 | |
| M1T3-800 | 3600–4200 | 826 (85) | 32 | 1,2 | 0,26 | 200 | 1000 | 500 | 0,028 | 125 | 4000 | |
| M1T2-800 | 2400–3600 | 910 (85) | 34 | 1,1 | 0,21 | 200 | 1000 | 400 | 0,028 | 125 | 4000 | |

тиристорные модули, изготовленные по технологии прижимного контакта, для применений в электрических цепях постоянного и переменного тока промышленной частоты.

Номенклатура выпускаемых модулей

В ПАО «Электровыпрямитель» освоено серийное производство беспотенциальных диодно-тиристорных модулей общепромышленного применения на токи 40–2500 А, напряжение 400–4400 В, с электрической прочностью изоляции 2500–9500 В RMS. Линейка

продукции насчитывает порядка 350 типов одно- и двухключевых модулей. Устройства с прижимными контактами выпускаются в восьми конструктивных исполнениях с шириной основания 20, 34, 50, 60, 70, 77 и 90 мм. В таблице 1 представлен конструктивный ряд серийно выпускаемых диодно-тиристорных модулей с указанием типа корпуса. Габаритно-присоединительные размеры большинства серийно освоенных в производстве модулей совместимы с общепринятыми размерами модулей зарубежных аналогов. Для простоты конструктивное исполнение модулей принято характеризовать шириной основания

корпуса. Подробную информацию с указанием габаритно-присоединительных размеров модулей можно найти на сайте в информационных материалах на конкретный тип [2]. Стандартное исполнение электрической схемы двухключевых модулей — полумост, также предлагаются варианты сборки в схемы с общим анодом или катодом. Доступные к исполнению электрические схемы соединения полупроводниковых элементов внутри модулей приведены на рисунке 1.

В таблицах 2–4 представлена номенклатура выпускаемых ПАО «Электровыпрямитель» модулей с указанием основных параметров, характеристик и типов корпусов.

Модули выпускаются по техническим условиям предприятия-изготовителя с учетом требований ГОСТ 30617-98 «Модули полупроводниковые силовые. Общие технические условия». Принятая структура условного обозначения модулей приведена на рис. 2.

Режим испытаний основных параметров и характеристик модулей проводится в соответствии с ГОСТ 24461-80 «Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний». Модули допускают эксплуатацию в условиях воздействия на них механических нагрузок согласно таблице 5.

Модули допускают эксплуатацию в условиях воздействия на них климатических факторов согласно таблице 6.

Конструктивно-технологические особенности

Конструктивно модуль представляет собой сборку полупроводникового элемента диода или тиристора (или их комбинацию) с токовыводами, соединенными через теплопроводящий изолятор с медным основанием посредством специального стягивающего устройства и размещенными в корпусе. Технологически законченный цикл производства подразумевает собственное изготовление полупроводниковых элементов диодов и тиристоров. Полупроводниковый элемент представляет неразъемное соединение кристалла на основе кремния, изготовленного по диффузионной технологии, с молибденовым диском, выполняющим роль термокомпенсатора. Прижимной контакт обеспечивает повышенную циклоустойкость модулей (более 100 000 циклов с перепадом температуры $\Delta T = +100$ °C). Обеспечение необходимой электрической прочности изоляции между основанием и потенциальными токовыводами модуля — необходимое условие их безотказной работы. Электрическая прочность изоляции V_{isol} большинства серийных модулей характеризуются значениями 2500–4000 В (эф. зн.) для условий приложения напряжения переменного тока частотой 50 Гц и длительностью 1 мин. Для отдельных типов модулей, по согласованию с потребителем, возможно исполнение с повышенным значением V_{isol} .

Таблица 4. Модули тиристорно-диодные и диодно-тиристорные низкочастотные

| Тип | V _{DRM} , V _{RRM} | I _{T(AV)} | I _{TSM} | V _{T(TO)} | r _T | (di _T /dt) _{cr} | (dv _D /dt) _{cr} | t _q | R _{th(j-c)} | T _{jmax} | V _{isol} | Корпус |
|------------------------|----------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------|
| | | (T _c , °C) | t _p = 10мс | T _{jmax} | T _{jmax} | T _{jmax} | T _{jmax} | тип. | | | | |
| | В | А | кА | В | мОм | А/мкс | В/мкс | мкс | °C/Вт | °C | В | |
| Основание 20 мм | | | | | | | | | | | | |
| МТД-40, МДТ-40 | 400–600 | 40 (85) | 0,8 | 10 | 3,8 | 200 | 500, 1000 | 100 | 0,68 | 125 | 2500 | MTD1 |
| МТД-63, МДТ-63 | 400–1600 | 63 (85) | 1,2 | 0,15 | 3 | 200 | 500, 1000 | 125 | 0,46 | 125 | 2500 | |
| МТД-80, МДТ-80 | 400–1600 | 80 (75) | 1,6 | 0,9 | 2 | 200 | 500, 1000 | 160 | 0,45 | 125 | 2500 | |
| Основание 34 мм | | | | | | | | | | | | |
| МТД1-100, МДТ1-100 | 2600–3200 | 116 (85) | 3,5 | 1,15 | 2,6 | 200 | 1000 | 320 | 0,18 | 125 | 2500 | MTD2 |
| МТД1-125, МДТ1-125 | 1800–2400 | 140 (85) | 4 | 1,05 | 1,5 | 200 | 1000 | 200 | 0,18 | 125 | 2500 | |
| МТД1-160, МДТ1-160 | 400–1600 | 180 (85) | 5 | 0,9 | 0,75 | 200 | 1000 | 160 | 0,18 | 125 | 2500 | |
| МТД1-200, МДТ1-200 | 400–1200 | 218 (85) | 5,5 | 0,83 | 0,58 | 200 | 1000 | 125 | 0,18 | 130 | 2500 | |
| МТД-100, МДТ-100 | 400–1600 | 100 (85) | 2,5 | 1,15 | 2,4 | 200 | 1000 | 160 | 0,22 | 125 | 2500 | |
| МТД-125, МДТ-125 | 400–1600 | 125 (85) | 3 | 1,1 | 1,8 | 200 | 1000 | 200 | 0,19 | 125 | 2500 | |
| МТД-160, МДТ-160 | 400–1600 | 160 (85) | 4,5 | 1 | 1,05 | 200 | 1000 | 200 | 0,18 | 125 | 2500 | |
| Основание 50 мм | | | | | | | | | | | | |
| МТД2-160, МДТ2-160 | 2600–3200 | 172 (85) | 5 | 1,15 | 1,5 | 200 | 1000 | 320 | 0,13 | 125 | 3000 | MTD3 |
| МТД2-200, МДТ2-200 | 1800–2400 | 207 (85) | 7 | 1,05 | 0,85 | 200 | 1000 | 250 | 0,13 | 125 | 3000 | |
| МТД1-250, МДТ1-250 | 1200–1800 | 269 (85) | 8 | 0,95 | 0,5 | 200 | 1000 | 160 | 0,13 | 130 | 3000 | |
| МТД1-320, МДТ1-320 | 600–1200 | 360 (85) | 10 | 0,85 | 0,35 | 200 | 1000 | 125 | 0,13 | 140 | 3000 | |
| МТД-200, МДТ-200 | 400–1600 | 200 (85) | 6 | 1,05 | 0,95 | 200 | 1000 | 160 | 0,13 | 125 | 3000 | |
| МТД-250, МДТ-250 | 400–1600 | 250 (85) | 7 | 1 | 0,53 | 200 | 1000 | 160 | 0,12 | 125 | 3000 | |
| Основание 60 мм | | | | | | | | | | | | |
| МТД2-250, МДТ2-250 | 3000–000 | 300 (85) | 6 | 1,2 | 1 | 200 | 1000 | 400 | 0,068 | 125 | 3000 | MTD5 |
| МТД1-400, МДТ1-400 | 1800–2400 | 407 (85) | 9 | 1,02 | 0,42 | 200 | 1000 | 250 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| МТД1-500, МДТ1-500 | 800–1800 | 500 (85) | 13 | 0,95 | 0,3 | 200 | 1000 | 200 | 0,068 | 130 | 3000 | |
| МТД-320, МДТ-320 | 2600–3200 | 357 (85) | 8 | 1 | 0,735 | 200 | 1000 | 320 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| МТД-400, МДТ-400 | 1300–1800 | 460 (85) | 13 | 0,92 | 0,32 | 200 | 1000 | 160 | 0,068 | 125 | 3000 | |
| МТД-500, МДТ-500 | 200–1200 | 545 (85) | 14 | 0,85 | 0,27 | 200 | 1000 | 125 | 0,068 | 130 | 3000 | |
| МТД-630, МДТ-630 | 200–1200 | 660 (85) | 15 | 0,81 | 0,25 | 200 | 1000 | 125 | 0,068 | 140 | 3000 | |
| Основание 77 мм | | | | | | | | | | | | |
| МТД2-400, МДТ2-400 | 3600–4000 | 492 (85) | 15 | 1,18 | 0,62 | 200 | 1000 | 400 | 0,042 | 125 | 3500 | MTD7 |
| МТД2-500, МДТ2-500 | 2900–3400 | 570 (85) | 18 | 1,1 | 0,4 | 200 | 1000 | 320 | 0,042 | 125 | 3500 | |
| МТД2-630, МДТ2-630 | 1900–2800 | 660 (80) | 20 | 1,05 | 0,35 | 200 | 1000 | 320 | 0,042 | 125 | 3000 | |
| МТД2-800, МДТ2-800 | 1300–1800 | 820 (85) | 23 | 0,93 | 0,17 | 200 | 1000 | 200 | 0,043 | 130 | 3000 | |
| МТД2-1000, МДТ2-1000 | 400–1200 | 1020 (85) | 28 | 0,9 | 0,13 | 200 | 1000 | 160 | 0,043 | 140 | 3000 | |
| МТД2-1250, МДТ2-1250 | 400–800 | 1266 (85) | 30 | 0,85 | 0,11 | 200 | 1000 | 160 | 0,043 | 150 | 3000 | |

Так, для модуля М1ДЛ-400 в корпусе МТД4-1 (габаритный размер представлен на рис. 3) значение V_{isol} нормируется на уровне 9500 В и обеспечивается конструктивно-технологическими особенностями.

В качестве изоляторов применяются диски из нитрида алюминия. Внутренний объем модуля заполняется компаундами с высокими диэлектрическими свойствами, который обеспечивает изоляцию внутри модуля и защиту полупроводниковых элементов от воздействия внешней среды и прямого попадания влаги. Дополнительными способами снижения напряженности электрических полей внутри корпуса является оптимальная конструкция деталей, определяемая для каждого типоразмера. При производстве модулей использованы конструкционные пластмассы, работающие в широком диапазоне температур –80...+150 °С. Большинство конструкционных деталей для сборки модулей изготавливается из отечественных материалов на собственных производственных мощностях — для изготовления металлических деталей применяются автоматизированные механообрабатывающие станки и универсальные фрезерные центры, корпусные детали из пластмасс производятся посредством литья на термопластавтоматах. Такая организация производства позволяет оперативно

исполнять заказы, включая возможности изготовления нестандартных деталей по вновь разработанным чертежам. Все применяемые материалы пожаробезопасны и относятся к классу самозатухающих и неподдерживающих горения.

Прижимная конструкция модулей предполагает необходимость применения достаточно толстого медного основания (в сравнении с паяной модульной конструкцией), которое участвует в системе прижима и обеспечивает жесткость механической системы. Жидкостный охладитель имеет большую толщину, чем стандартное основание модуля, что позволяет смонтировать модуль прямо на охладитель. Такое конструктивное отличие фактически само предопределяет возможность исключения из системы теплопередачи дополнительного контакта между основанием модуля и охладителем, в том числе позволяет обойтись без интерфейса теплопроводящей пасты. Применение встроенного охлаждения улучшает эффективность теплоотвода на 25% в сравнении с классической системой, что в свою очередь ведет к увеличению токовых характеристик на 15–20% [3].

В ПАО «Электровыпрямитель» разработана серия одно- и двуключевых тиристорных и диодных модулей с встроенным жидкост-

Таблица 5. Механические нагрузки

| Наименование воздействующего фактора | Значение фактора | |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------|
| Вибрация | диапазон частот, Гц | 0,5–55 |
| | ускорение, м/с ² (g) | 10 (1) |
| Многочисленные удары | ускорение, м/с ² (g) | 80 (8) |
| | длительность, мс | 2–15 |

Таблица 6. Климатические факторы

| Наименование воздействующего фактора | Значение фактора по ГОСТ 15150 | |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| | УХЛ40 | О4 |
| Рабочая температура окружающей среды, °C | –60...+40 | –1...+55 |
| Относительная влажность воздуха при температуре | +25 °C, % | 80 |
| | +35 °C, % | 98 |
| Атмосферное давление, Па (мм рт. ст.) | (86–106)×10 ³ (650–800) | |

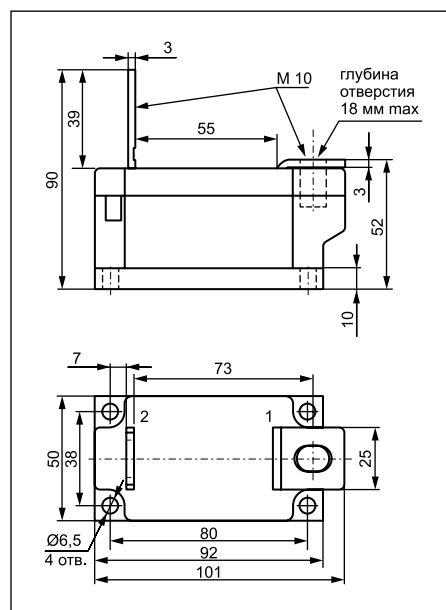


Рис. 3. Габаритный чертеж модуля М1ДЛ-400

ным охлаждением. Краткие характеристики модулей представлены в таблицах 7, 8. Габаритно-присоединительные размеры модулей со встроенным жидкостным охлаждением представлены на рис. 4. За счет внешнего соединения силовых выводов модулей электрическую схему полумоста можно образовать во встречно-параллельное соединение двух тиристоров, что часто используется потребителями данных типов модулей при эксплуатации в ключах переменного тока. Поэтому для тиристорных модулей нормирование токовой нагрузки производится по параметру действующего значения тока I_{RM5}, предусматривая работу модуля в схеме ключа переменного тока. По требованию заказчика возможна комплектация корпусов типа МТД3-1, МТД5-1, МТД7-1 диодными элементами на различные классы по напряжению. Для диодного одноключевого модуля в корпусе МТД8-1 приведены значения максимально допустимого действующего прямого тока I_{RM5} для температуры охлаждающей жидкости T_w.

Таблица 7. Модули тиристорные со встроенным жидкостным охлаждением

| Тип | V_{RRM} V_{RRM} | I_{RMS} | I_{TSM} | $V_{T(ТО)}$ | r_T | $(di_T/dt)_{cr}$ | $(dv_D/dt)_{cr}$ | t_q | $R_{th(j-w)}$ | T_{jmax} | V_{isol} | Корпус |
|------------------|------------------------|------------------------|---------------|-------------|------------|------------------|------------------|-------|---------------|------------|------------|--------|
| | | (T_w , °C) | $t_p = 10$ мс | T_{jmax} | T_{jmax} | T_{jmax} | T_{jmax} | тип. | | | | |
| | В | А | кА | В | МОм | А/мкс | В/мкс | мкс | °C/Вт | °C | В | |
| M2T-800-...-OB | 1200–1800 | 825 (25) 735 (40) | 8 | 0,95 | 0,5 | 200 | 1600 | 160 | 0,2 | 130 | 3000 | MTD3-1 |
| M2T-1550-...-OB | 400–1200 | 1573 (25) 1418 (40) | 17 | 0,81 | 0,25 | 200 | 1000 | 160 | 0,13 | 140 | 3000 | MTD5-1 |
| ♦M2T-2300-...-OB | 400–1200 | 2358 (25) 2108 (40) | 30 | 0,9 | 0,15 | 200 | 1000 | 160 | 0,084 | 140 | 3000 | MTD7-1 |

Таблица 8. Модули диодные со встроенным жидкостным охлаждением

| Тип | V_{RRM} | I_{RMS} | I_{FSM} | V_{TO} | r_T | $R_{th(j-w)}$ | T_{jmax} | V_{isol} | Корпус |
|------------------|-----------|------------------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|------------|--------|
| | | (T_w , °C) | $t_p = 10$ мс | T_{jmax} | T_{jmax} | | | | |
| | В | А | кА | В | МОм | °C/Вт | °C | В | |
| ♦M1Д-2500-...-OB | 1200–2400 | 2820 (25) 2570 (40) | 55 | 0,85 | 0,075 | 0,07 | 150 | 3000 | MTD8-1 |

Рекомендации по эксплуатации

Для работы модули должны устанавливаться на охладители, обеспечивающие оптимальный тепловой режим. Для улучшения теплового контакта рекомендуется перед монтажом смазывать контактные поверхности охладителей невысыхающей теплопроводящей смазкой.

Монтаж модулей на охладитель должен осуществляться при помощи винтов с установленным в паспорте значением крутящего момента. Затягивание винтов крепления к охладителю проводится в несколько этапов и в определенной последовательности, в соответствии с указаниями паспорта на конкретный тип модуля:

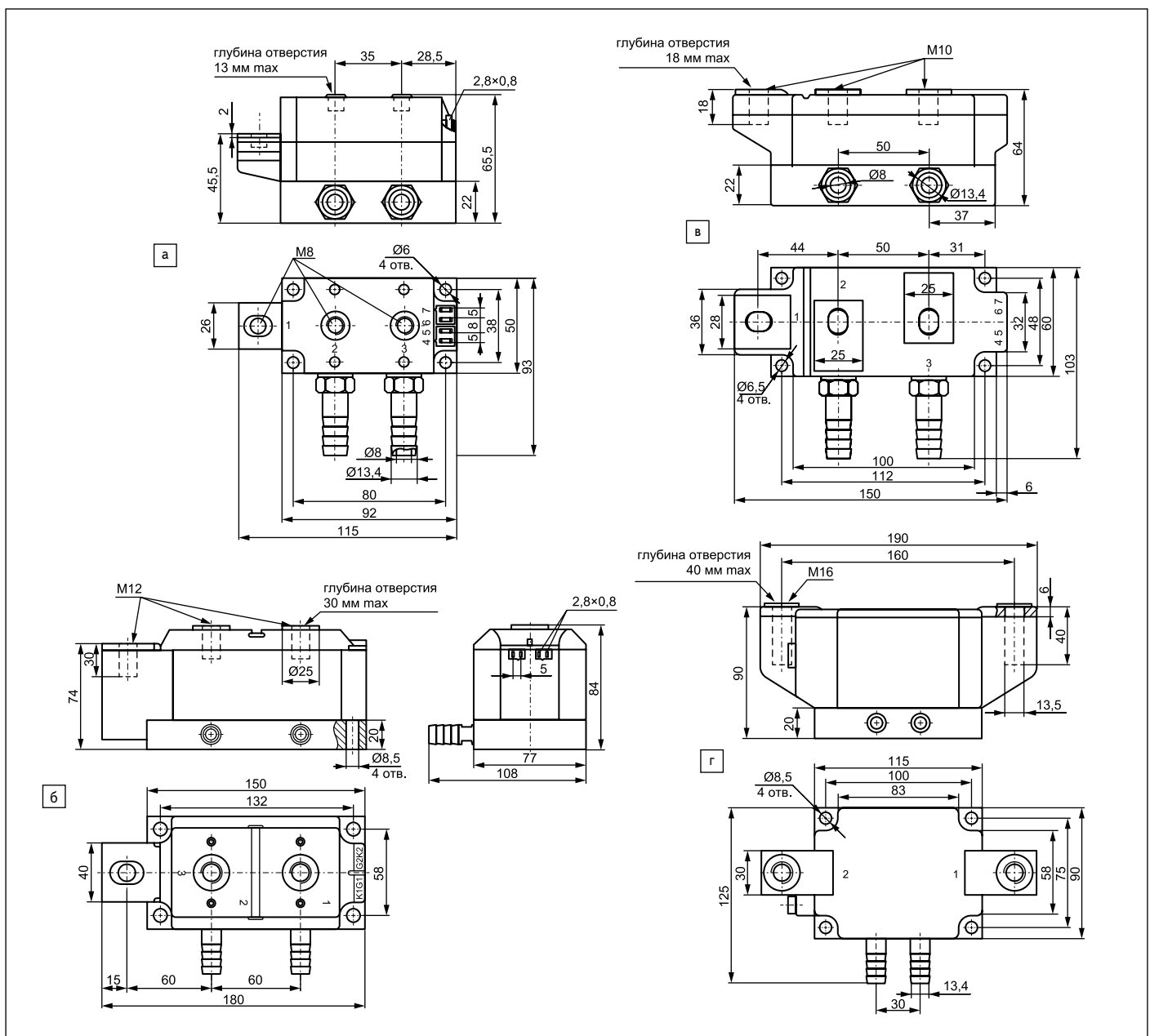


Рис. 4. Габаритные чертежи, электрические схемы соединения модулей со встроенным жидкостным охлаждением: а) MTD3-1 ($w = 1400$ р); б) MTD5-1 ($w = 2200$ р); в) MTD7-1 ($w = 4000$ р); г) MTD8-1 ($w = 4300$ р)

- винты ввинчиваются и затягиваются с крутящим моментом величиной 10% от номинального значения для данного модуля;
- винты затягиваются с крутящим моментом величиной 30–40% от номинального значения для данного модуля;
- винты затягиваются с номинальным крутящим моментом;
- минимум через 3 ч после монтажа винты необходимо повернуть, соблюдая заданный крутящий момент.

Значения номинальных крутящих моментов винтов и их тип для различных вариантов конструктивного исполнения представлен в таблице 9. Значения крутящих моментов винтов (болтов) для подсоединения токоведущих шин к модулям также регламентировано и приведено в таблице 10. При монтаже не допускается приложение усилия, вызывающее деформацию и смещение шин. Винты (болты) для присоединения токоведущих шин к модулям входят в комплект поставки. Крепежные детали для монтажа модуля на охладитель в комплект поставки не входят.

Для управления тиристорными элементами в комплекте с модулями могут быть поставлены присоединительные колодки длиной 120–150 мм. Длина гибких выводов варьируется исходя из требований потребителя и может быть изменена по согласованию.

Для предупреждения повреждения элементов модулей при аварийных ситуациях в преобразовательном устройстве необходимо предусматривать схемы защиты от недопустимых перегрузок, коротких замыканий, от коммутационных внешних и внутренних перенапряжений:

- для защиты от сверхтоков при коротких замыканиях в цепи нагрузки необходимо использовать плавкие предохранители или быстродействующие выключатели;
- для ограничения коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутации элементов модуля, необходимо использовать защитные (снабберные) RC-цепи;
- при эксплуатации модулей в схеме преобразовательного устройства должна быть предусмотрена защита от эпизодических сетевых и схемных перенапряжений короткими высоковольтными импульсами (реакторы, варисторы, быстродействующие разрядники, конденсаторы), вызванных действием сетевой коммутационной аппаратуры и атмосферных явлений.

В случае необходимости применения групповых соединений по согласованию с потребителем возможно осуществление дополнительного подбора модулей в процессе их изготовления. Групповое последовательное или параллельное соединение силовых полупроводниковых приборов, в том числе модулей, требует применения специальных устройств для обеспечения равномерного деления напряжения или тока между отдельными модулями. Один из способов обеспечения надежной работы при после-

Таблица 9. Информация для монтажа модулей на охладитель

| Тип корпуса | Обозначение крепежа | Количество крепежа, шт. | Крутящий момент, Н·м |
|--------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| MTD1 | Винт M5 | 2 | 5 ± 1 |
| MTD2 | Винт M6 | 2 | 5 ± 1 |
| MTD3, MTD3-1 | Винт M6 | 4 | 5 ± 1 |
| MTD4 | Винт M6 | 4 | 5 ± 1 |
| MTD5, MTD5-1 | Винт M6 | 4 | 6 ± 1 |
| MTD6 | Винт M6 | 4 | 10 ± 5 |
| MTD7, MTD7-1 | Винт M6 | 4 | 6 ± 1 |
| MTD8, MTD8-1 | Винт M8 | 4 | 8 ± 1 |
| MTD9 | Винт M5 | 2 | 5 ± 1 |

Таблица 10. Информация для монтажа шин к токовыводам модулей

| Тип корпуса | Обозначение крепежа | Количество крепежа, шт. | Крутящий момент, Н·м |
|--------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| MTD1 | Винт M5 | 3 | 2,5 ± 1 |
| MTD2 | Винт M6 | 3 | 2,5 ± 1 |
| MTD3, MTD3-1 | Болт M8 | 3 | 9 ± 1 |
| MTD4 | Болт M10 | 2 | 10 ± 1 |
| MTD5, MTD5-1 | Болт M10 | 3 | 10 ± 1 |
| MTD6 | Болт M12 | 2 | 18 ± 5 |
| MTD7, MTD7-1 | Болт M10 | 3 | 10 ± 1 |
| MTD8, MTD8-1 | Болт M12 | 2 | 18 ± 5 |
| MTD9 | Винт M6 | 1 | 2,5 ± 1 |

довательном соединении силовых полупроводниковых модулей — применение схемотехнических решений с использованием RC-цепей. Одним из требований к RC-цепям с целью их эффективной работы является то, что они должны размещаться в непосредственной близости от элементов модуля и подключаться короткими проводниками. Данное требование и опыт производства полупроводниковых резисторов таблеточного исполнения [4] определили задачу разработки кремниевых резисторов в модульном исполнении. Конструктивно модуль выполнен по технологии прижимного контакта, но с потенциальным основанием (внешний вид и габаритно-присоединительные размеры МРК приведены на рис. 5). Основание модуля одновременно служит одним из выводов резистора и позволяет размещать его в непосредственной близости к силовому полупроводниковому прибору, минимизируя индуктивные связи. Основные параметры и характеристики модулей серии МРК представлены в таблице 11, крепежные детали для монтажа модуля на охладитель и токоведущих шин в таблицах 9, 10. Поставка данных изделий производится по предварительному согласованию.

Таблица 11. Кремниевый резистор в модульном исполнении

| Наименование параметра | МРК-5,1 | МРК-10 | МРК-15 | МРК-24 | МРК-30 | Корпус |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Номинальное сопротивление, Ом | 5,1 | 10 | 15 | 24 | 30 | MTD9 |
| Отклонение от номинального сопротивления | ±10% | | | | | |
| Температурная характеристика сопротивления в интервале температур от +25 °С до T _{max} | 10% | | | | | |
| Средняя рассеиваемая мощность (T _{кор.} = +85 °С), В | 200 | | | | | |
| Импульсное рабочее напряжение, не более, В | 1000 | | | | | |
| Максимальная температура, °С | 125 | | | | | |

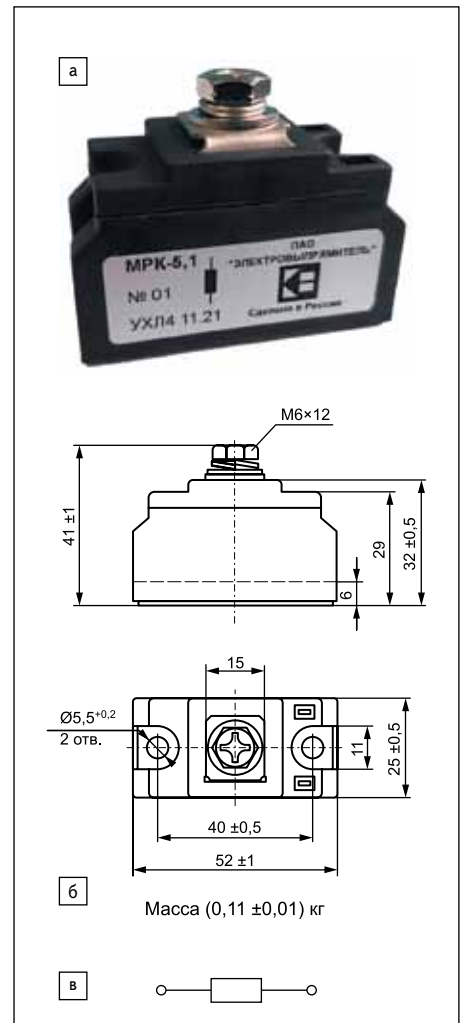


Рис. 5. Модули серии МРК: а) внешний вид МРК-5,1; б) габаритный чертеж; в) электрическая схема соединения модуля

Заключение

В статье представлен обзор диодно-тиристорных модулей для применений в электрических цепях постоянного и переменного тока промышленной частоты, показаны возможности разработки и освоения производства новых типов изделий силовых полупроводниковых приборов. Все семейство модулей, изготавливаемых ПАО «Электровыпрямитель», гораздо шире, и ознакомиться с выпускаемой номенклатурой можно на сайте предприятия [2]. Индивидуальный подход к каждому заказу позволяет совершенствовать функциональные характе-

ристики изделий и оперативно осваивать выпуск модулей с системой параметров, требуемой конкретному потребителю [5]. В условия новых реалий, нарушивших привычные экономические и логистические связи, в очередной раз становится очевидным, что только опора на отечественные решения позволят сохранить непрерывную производственную деятельность российских промышленных предприятий, объектов энергетики и транспорта. ■

Литература

1. Самойлов А., Лебедева Л., Наумов Д., Тиманина С., Осипова Е., Демидова Ю. Мощные таблеточные диоды и тиристоры компании «Электровыпрямитель» // Компоненты и технологии. 2022. № 4.
2. www.elvpr.ru
3. Немаев Д., Мускатиный В., Биктиев Р. Прямое жидкостное охлаждение // Силовая электроника. 2021. № 4.
4. Чибиркин В. В., Гейфман Е. М., Батяев П. Ю. Моделирование высоковольтного полупроводникового резистора при разработке мощных кремниевых резисторов в таблеточной конструкции // Электротехника. 2009. № 6.
5. Варянова Г., Матвеев В., Дружинин А., Немаев Д., Оруджев Х., Тишкина Л., Учайкина А., Мушкетова Н. Тиристорные модули высокой мощности для электропривода // Силовая электроника. 2021. № 2.