

МДП-ТРАНЗИСТОРЫ КАК ДИОДЫ

При проектировании синхронных выпрямителей необходимо провести моделирование вольтамперных характеристик основных схем диодных включений МДП-транзисторов.

В самом общем виде при математическом моделировании (*mathematical modeling*) сначала проводят математическое описание предметной задачи. После этого проводят собственно моделирование (*simulation*) – реализацию математического описания предметной задачи с использованием символьного и схмотехнического моделирования.

Символьное моделирование – реализация математического описания предметной задачи при помощи системы *MathCAD 2000 PRO*. Схмотехническое моделирование – реализация предметной задачи при помощи и на основе предлагаемых моделей системы проектирования электронных устройств *DesignLab 8.0*. В результате должны быть выявлены принципиальные свойства основных схем диодных включений МДП-транзисторов для прогнозирования электрических процессов в синхронных выпрямителях.

Свойства МДП-транзистора

При управлении от источника напряжения под воздействием управляющего напряжения индуцируется омический слой (канал), сечение которого теперь зависит от величины управляющего напряжения. МДП-транзистор – униполярный прибор: ток создаётся потоком основных носителей. Накопления и рассасывания неосновных неравновесных носителей не происходит, поэтому уменьшается время переключения. Температурный коэффициент сопротивления канала – положительный, поэтому отсутствует шнурование тока, кумулятивный перегрев и, как следствие, вторичный пробой. Собственные емкости МДП-транзистора: емкость затвор – исток практически не зависит от напряжения, емкости затвор – сток и сток – исток зависят от напряжения. Вольтамперная характеристика прямой передачи – параболическая зависимость выходного тока от управляющего напряжения. Вольтамперная выходная характеристика – зависимость выходного тока от выходного напряжения с начальной областью постоянного сопротивления переходящей в область постоянного тока после смыкания канала. Вольтамперная характеристика инверсного включения – диодная прямого смещения.

Характеристики, параметры и модели МДП-транзистора, позволяющие представить его как элемент устройств силовой электроники, приведены в технической литературе.

Включение и выключение МДП-транзистора на активную нагрузку

1 этап. При подаче импульса от источника напряжения с определенным выходным сопротивлением напряжение на затворе увеличивается до порогового напряжения (образование канала). Время 1-го этапа зависит от величины сопротивления резистора в цепи затвора.

2 этап. Увеличивается выходной ток, уменьшается напряжение стока. Входное сопротивление и емкость затвор – сток образуют интегратор, при этом значение эффективной емкости интегратора зависит от коэффициента усиления МДП-транзистора. Напряжение на затворе увеличивается медленнее по сравнению с 1-м этапом, время спада напряжения стока замедляется.

3 этап. Напряжение стока достигает практически установившегося значения, выходной ток увеличивается и ограничивается внешним резистором. Скорость изменения напряжения на затворе соответствует 1-му этапу.

4 этап. МДП-транзистор включен.

5 этап. Управляющее напряжение – импульс противоположной полярности (или практически нулевой величины) от источника напряжения с выходным сопротивлением. Неосновных неравновесных носителей в канале нет, выключение начинается сразу.

6 этап аналогичен 1-му этапу.

7 этап аналогичен 2-му этапу.

8 этап. МДП-транзистор выключён.

Диодное включение МДП-транзистора целесообразно при условии обеспечения В-А режима прямого напряжения, меньшего напряжения в прямом направлении, при одном и том же токе, диода Шоттки.

Вольтамперная характеристика диода может быть записана в следующем виде:

$$i_o(U) = I_0 \left[\left(e^{\frac{U+U_{on}}{m\phi_t}} - 1 \right) - e^{\frac{-U-U_b}{m\phi_t}} \right], \quad (1)$$

где:

$I_0 = 1 \text{ мкА}$ – тепловой ток;

$\phi_t = 26 \text{ мВ}$;

$m = 1,8$ – эмпирическая постоянная,

$U_{on} = 0,4 \text{ В}$ – напряжение кусочно-линейной аппроксимации ВАХ диода,

$U_b = 210 \text{ В}$ – напряжение лавинного пробоя.

На рис. 1 показан график ВАХ диода.

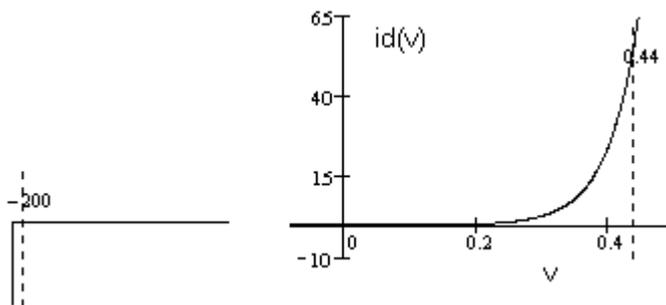


Рис. 1. Вольтамперная характеристика диода

Семейство вольтамперных характеристик МДП-транзистора может быть представлено следующей системой уравнений. В этих уравнениях не учитывают внутренний р-п переход и записывают в виде отдельных уравнений.

$$i_c = \begin{cases} 2I_0 \left[\left(\frac{U_{зи}}{U_0} - 1 \right) \frac{U_c}{U_0} - 0,5 \left(\frac{U_c}{U_0} \right)^2 \right] + 0,1U_c, & U_c \leq 2(U_{зи} - U_0); \\ I_0 \left(\frac{U_{зи}}{U_0} - 1 \right)^2 + 0,1U_c, & U_c \geq U_{зи} - U_0, \end{cases} \quad (2)$$

где: I_c – ток стока,

I_0 – относительная удельная крутизна, определяющая "масштаб" характеристик,

$U_{си}$ – напряжение сток – исток,

$U_{зи}$ – напряжение затвор – исток,

U_0 – пороговое напряжение (перекрытие канала),

$0,1UV_c$ – наклон стоковых характеристик.

Система (2) в записывается с учетом условий перекрытия канала в виде двух уравнений, отражающих переходные и выходные ВАХ МДП-транзистора. На рис. 2 показана поверхность ВАХ МДП-транзистора со стороны стоко-затворных и со стороны стоковых характеристик.

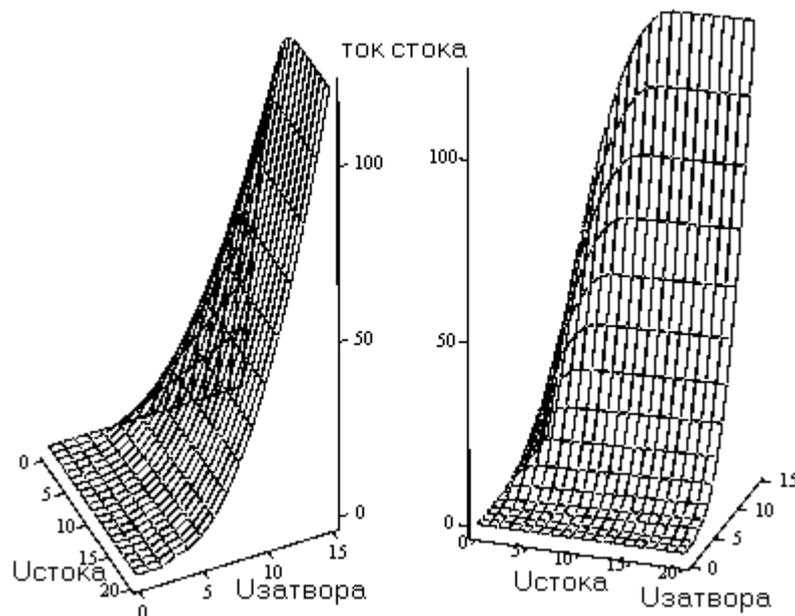


Рис. 2. Поверхность семейства вольтамперных характеристик МДП-транзистора: стоко-затворная и стоковая. (Показаны два ракурса)

Диодное включение МДП-транзистора для режима прямого (инверсного для МДП-транзистора) напряжения: МДП-транзистор открыт, внутренний (параллельный) $p-n$ переход в режиме прямого напряжения. Диодное включение МДП-транзистора для режима обратного (прямого для МДП-транзистора) напряжения: МДП-транзистор закрыт, $p-n$ переход в режиме обратного напряжения. Параллельно внутреннему $p-n$ переходу подключают внешний диод с меньшим временем восстановления, разгружающий внутренний $p-n$ переход. Семейство вольтамперных характеристик МДП-транзистора с внешним диодом (и с внутренним $p-n$ переходом) может быть представлено следующей системой уравнений

$$i_m = \begin{cases} 2I_0 \left[\left(\frac{U_{zu}}{U_0} - 1 \right) \frac{U_c}{U_0} - 0,5 \left(\frac{U_c}{U_0} \right)^2 \right] + 0,1 \cdot U + i_d(U), & U \leq 2(U_{zu} - U_0); \\ I_0 \left(\frac{U_{zu}}{U_0} - 1 \right)^2 + 0,1 \cdot U, & U \geq U_{zu} - U_0. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 3 показаны графики ВАХ диода, МДП-транзистора с диодом и параллельное соединение МДП-транзисторов с диодами.

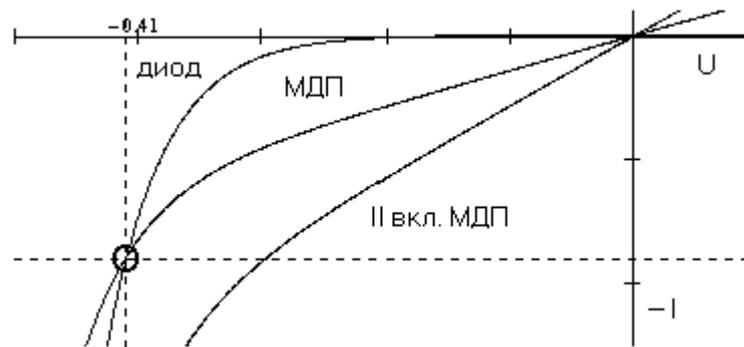


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики диода, МДП-транзистора с внешним диодом и параллельное соединение МДП-транзисторов с диодами. Для примера параллельно с МДП-транзистором соединен диод с относительно большим падением напряжением.

На рис. 3 выделено пересечение ВАХ диода и МДП-транзистора (с диодом). Параллельное соединение МДП-транзисторов повышает эффективность их применения. При параллельном соединении диодов режим прямого напряжения практически не изменяется.

Схемотехническое моделирование позволяет перейти от общего представления ВАХ МДП-транзистора к более детальному анализу ВАХ различных способов диодного включения МДП-транзисторов. При этом можно использовать стандартные модели, включенные в систему *Design Lab*. Возможно имитационное моделирование новых типов МДП-транзисторов, изменяя некоторые параметры близкого по характеристикам включенного в *SPICE* МДП-транзистора

Стандартные модели, включенные в систему *Design Lab* существенно хуже МДП-транзисторов, используемых в серийных изделиях. Сопротивление канала модели равно 0,25 Ом вместо фактических 0,01 Ом. При этом схемы включения при любых сопротивлениях канала будут иметь адекватные свойства. На рис. 4 приведены стандартные ВАХ модели. Желательно, обеспечивать включение МДП-транзистора к моменту включения обратного напряжения.

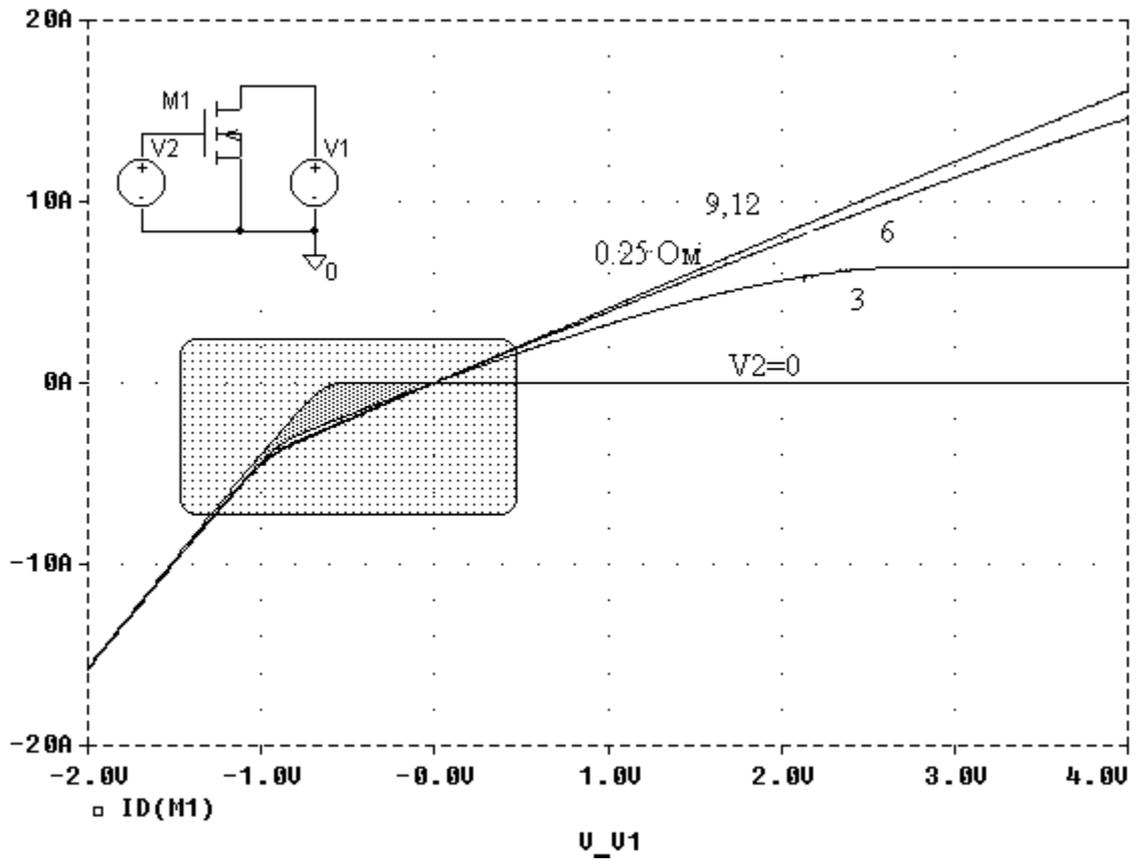


Рис. 4. Вольтамперные характеристики модели с внутренним p-n переходом

Две схемы диодного включения и их ВАХ показаны на рис. 5. В этих схемах собственно транзистор не

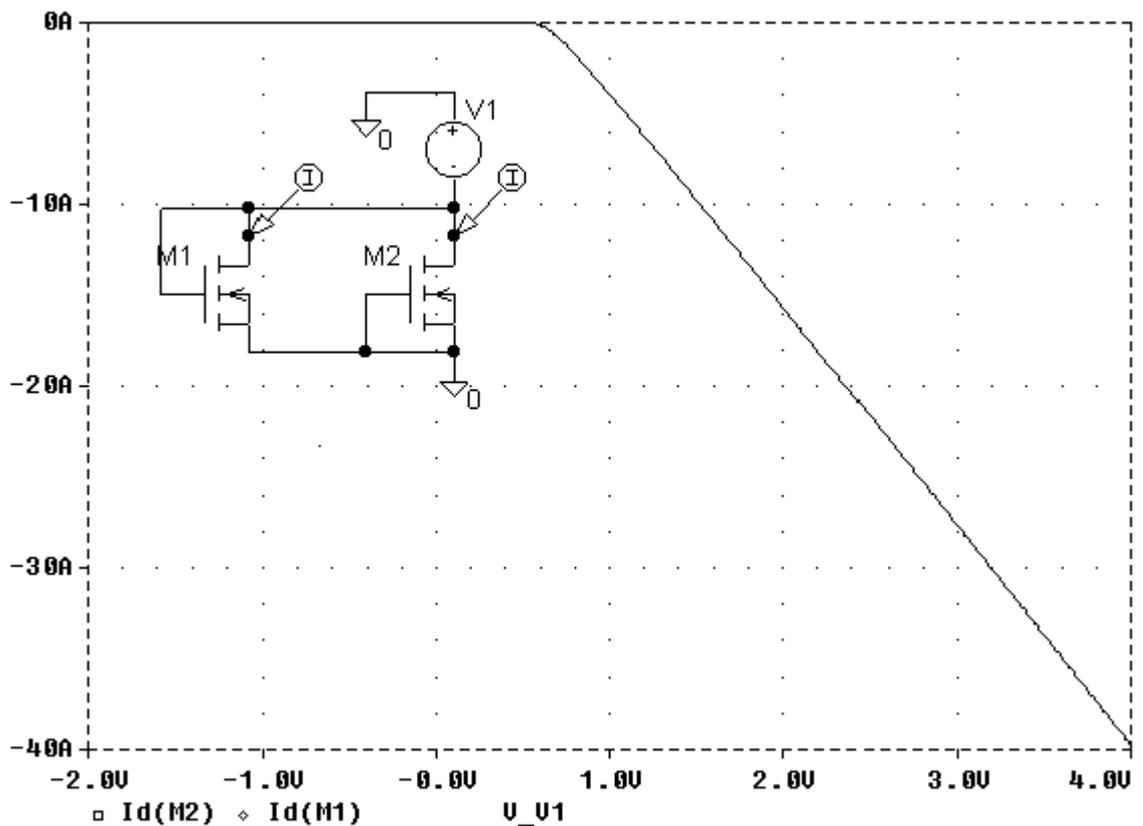


Рис. 5. Функционирует только внутренний p-n переход

используется. На рис. 6 приведены две схемы, в которых применяются дополнительные транзисторы, обеспечивающие непрерывную готовность включения основных транзисторов. Включение основных транзисторов производится по силовой цепи. При низких входных напряжениях основные транзисторы могут вообще не функционировать. На рис. 7 приведена схема из четырех параллельно включенных транзисторов, затворы которых соединены с истоком управляющего транзистора.

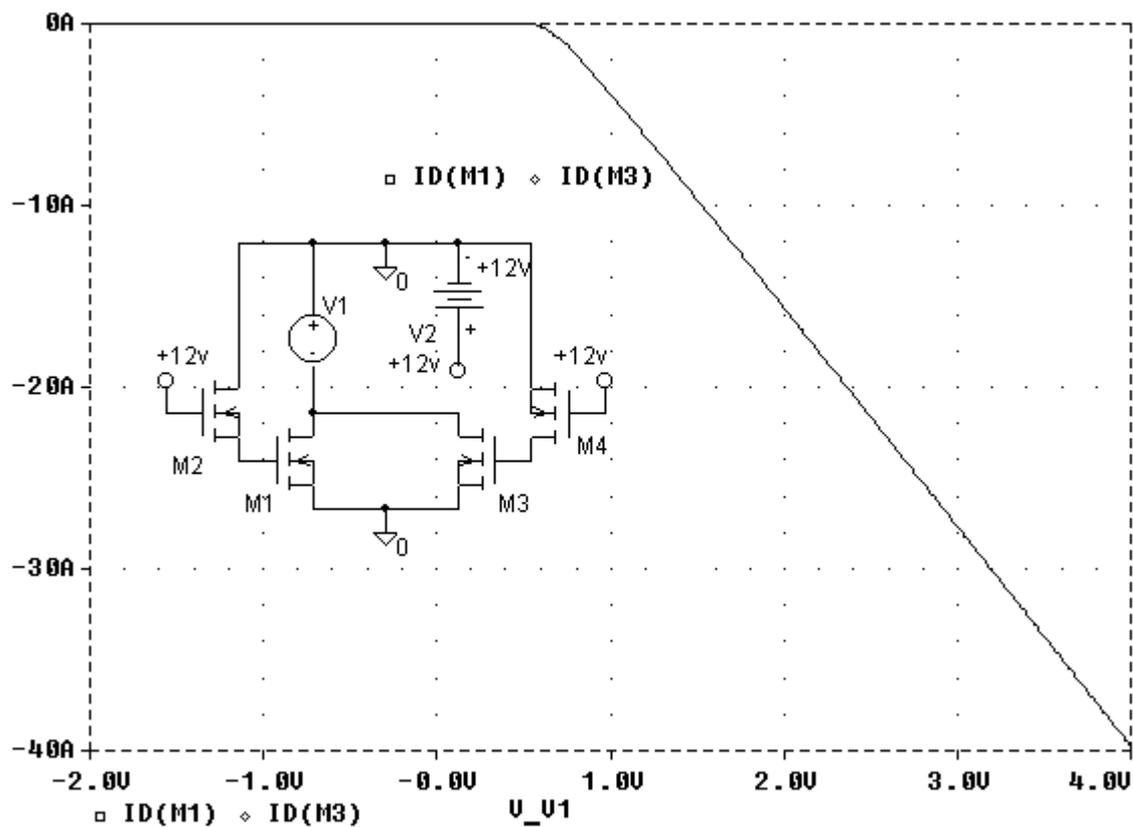


Рис. 6. Результат как на рис. 5

Типовая схема синхронного выпрямителя на основе диодного включения МДП-транзисторов показана на рис. 8.

Таким образом:

- стандартное уравнение ВАХ диода дополнено условием лавинного пробоя перехода;
- семейство вольтамперных характеристик МДП-транзистора дополнено уравнением ВАХ внешнего диода (подключенного параллельно внутреннему $p-n$ переходу);
- диодное включение МДП-транзистора целесообразно использовать при условии обеспечения В-А режима прямого напряжения, меньшего напряжения в прямом направлении диода Шоттки, при одном и том же токе. При этом рекомендуется включать до восьми МДП-транзисторов параллельно;
- эффективность схем диодных включений МДП-транзисторов, используемых в синхронных выпрямителях, обеспечивается только при полном синхронном импульсном переключении транзистора независимо от формы и величины входного периодического напряжения.

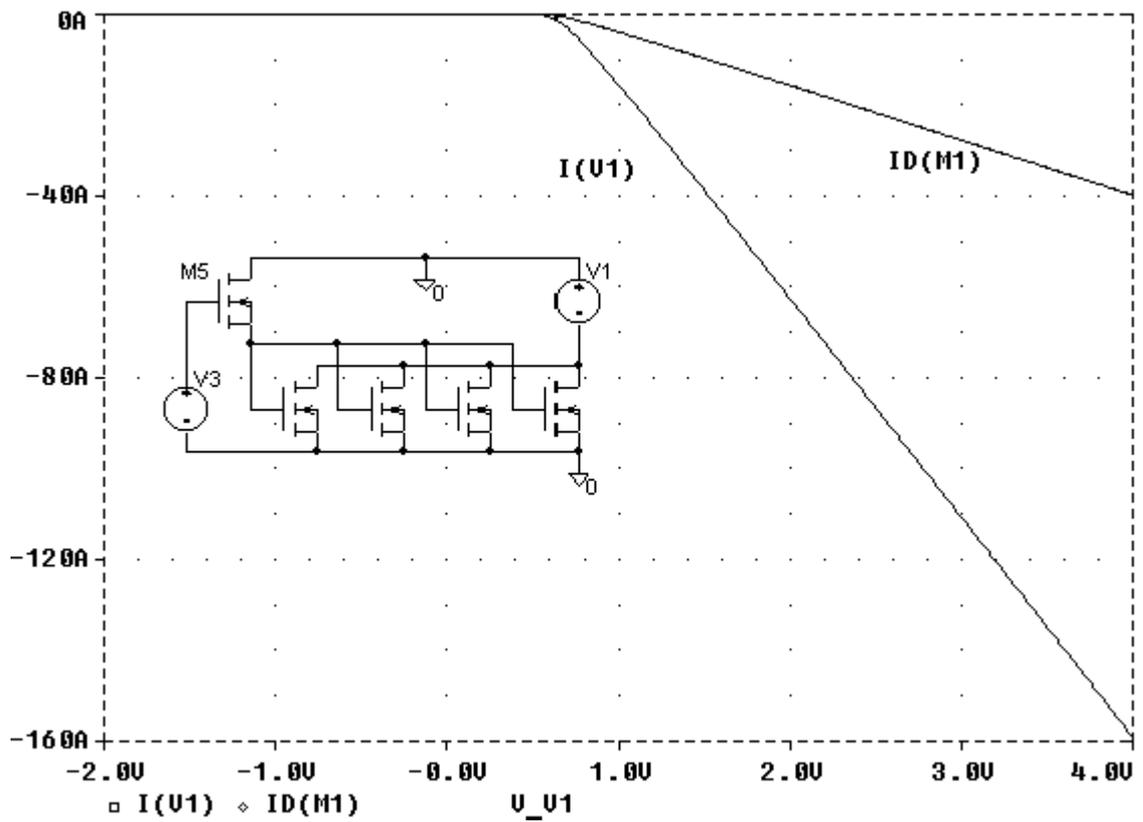


Рис. 7. ВАХ с одним транзистором (как левая схема рис. 6) и с группой из четырех транзисторов.

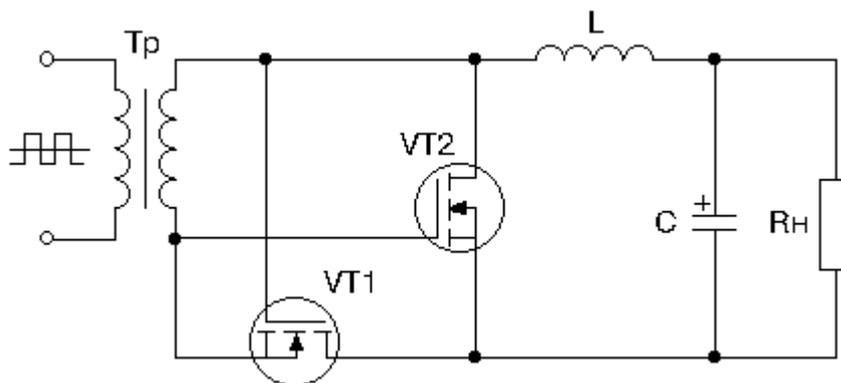


Рис. 8. Типовая схема синхронного выпрямителя