

Моделирование термоэлектрического модуля (ТЭМ) в LTSpice

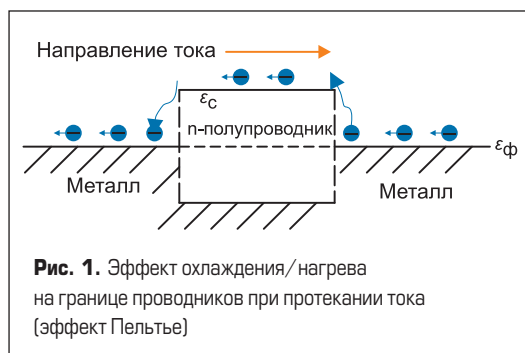
Современные автономные датчики требуют развития системы питания от аккумуляторов. Для некоторых применений таких сенсоров идет активное развитие маломощных генераторов от доступных источников (вибрации, освещения, перепада температур). Сегодня данные приборы становятся дополнением к батарейной системе и позволяют значительно увеличить срок службы автономного узла. Расчеты в LTSpice помогают точно оценить работоспособность проектируемой системы и упростить разработку. В статье рассмотрен один из видов такой генерации — от перепада температур.

Дмитрий Василенко

ТЭМ — технические особенности и использование в качестве генератора энергии

Генерация энергии от перепада температур возможна при использовании современных термоэлектрических модулей (ТЭМ), работающих на эффектах Пельтье, Зеебека и Томсона. Конструкция и применение этих модулей хорошо описана в ряде статей, например в [1].

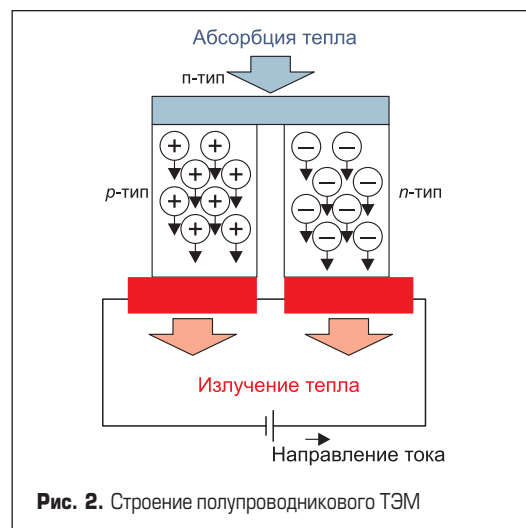
В основе функционирования ТЭМ лежит эффект Пельтье, описанный Жаком Пельтье в 1834 году. Эффект состоит в следующем: при протекании постоянного электрического тока через цепь из различных проводников место соединения проводников охлаждается или нагревается в зависимости от направления тока. При этом количество поглощаемой теплоты пропорционально току, проходящему через проводники. В XX веке в результате работ российского академика А. Ф. Иоффе и его сотрудников были синтезированы полупроводниковые сплавы, которые позволили применить этот эффект на практике.

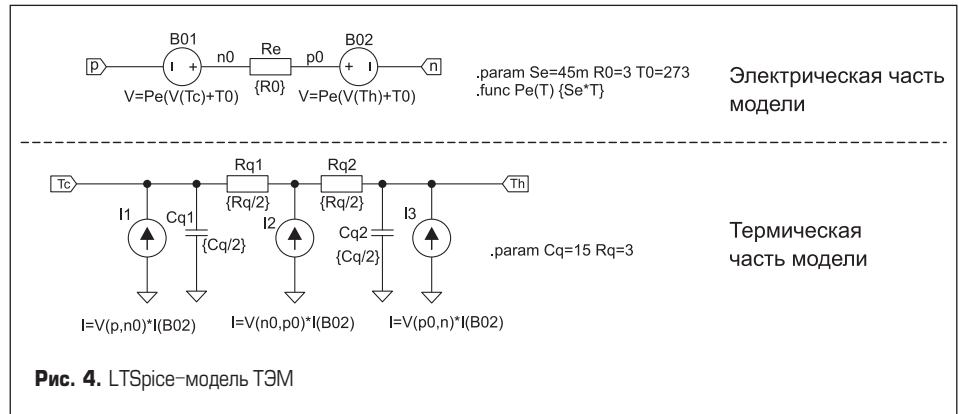
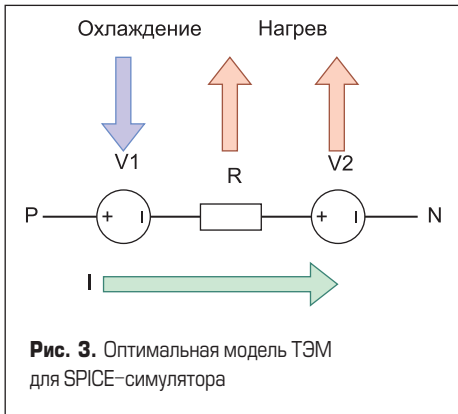


Эффект Пельтье можно наглядно представить на примере перехода металл/полупроводник (рис. 1). Поскольку средняя энергия носителей заряда (например, электронов) в различных проводниках различна и зависит от энергетического спектра, концентрации, рассеяния, то при переходе из одного проводника в другой электроны либо передают энергию решетке (нагрев), либо отбирают (охлаждение).

Современные модули ТЭМ состоят из базовых ячеек — термопар, которые представляют собой последовательно соединенных два электрически разнородных элемента с *p*- и *n*-типом проводимости. При этом такие элементы термически соединены параллельно (рис. 2).

ТЭМ-модули применяются в различных областях: радиоэлектронике (стабилизация температуры





оптических модулей и охлаждение процессоров), медицине (мобильные охлаждающие контейнеры), лабораторном оборудовании, генераторах энергии для удаленных малопотребляющих датчиков.

Модель ТЭМ для LTSpice

Теоретические основы модели

Для предварительной оценки проектируемой системы с ТЭМ-модулем можно использовать LTSpice, но для удобства инженеров такая модель должна быть простой и по возможности настраиваемой на основе данных из документации на приобретенный модуль. Хороший пример такого типа модели представлен в работе [2].

Модель построена на основе термоэлектрической схемы из двух термоэлектрических переходов и собственного электрического сопротивления термоэлектрического модуля (рис. 3).

Электрические соотношения для модели выглядят таким образом:

$$\begin{aligned} P_{V1} &= -V_1 I, \\ P_R &= R I^2, \\ P_{V2} &= -V_2 I, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_1 и V_2 — напряжения на переходах в связи с термоэлектрическими процессами на этих переходах.

Электрические формулы необходимо связать с термоэлектрическими эффектами Пельтье — Зеебека — Томсона, которые описываются соотношениями:

$$\begin{aligned} P_Q &= \Pi \times I, \\ V_S &= \alpha (T_h - T_c), \\ \Pi &= \alpha T, \end{aligned} \quad (2)$$

где α — коэффициент Зеебека; T_h и T_c — значения абсолютных температур на поверхностях ТЭМ.

Объединяя электрические (1) и термические (2) соотношения, получаем баланс напряжения, который можно использовать для моделирования ТЭМ:

$$P_{PN} = -\Pi_c + \Pi_h + IR. \quad (3)$$

Модель ТЭМ для LTSpice

Модель ТЭМ для LTSpice представлена на рис. 4. Она состоит из электрической

и термической частей, связанных между собой соотношениями Пельтье, Зеебека и Томсона.

Электрическая часть модели учитывает термоэлектрические эффекты Пельтье, Зеебека и Томсона. Для организации этой части использован источник напряжения, зависящего от параметров (behavioral, Bxx). В электрической части модели использованы параметры:

- Se — коэффициент Зеебека;
- R0 — сопротивление ТЭМ.

В термической части модели применена аналогия тепловых — электрических характеристик, при этом используется соответствие:

- напряжение — температура,
- ток — мощность.

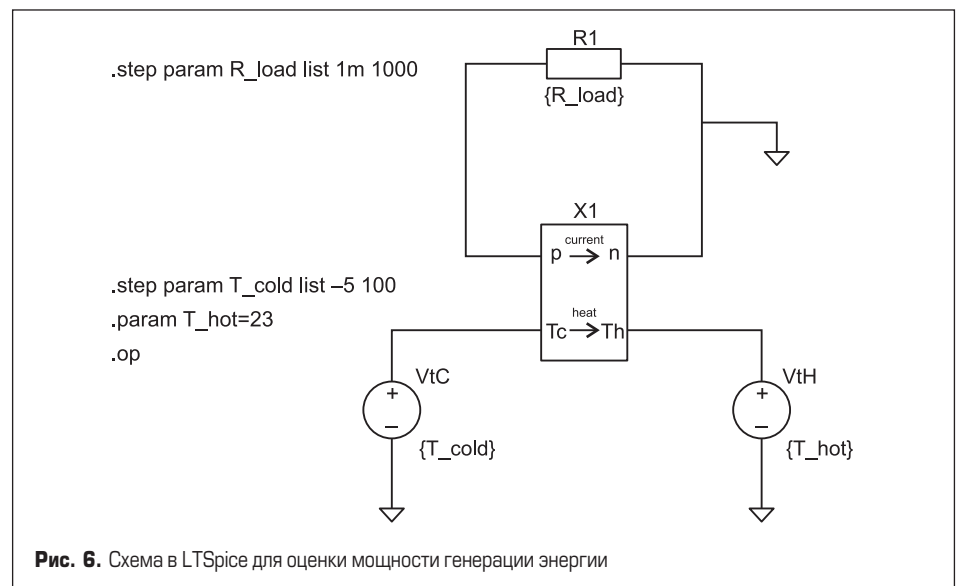
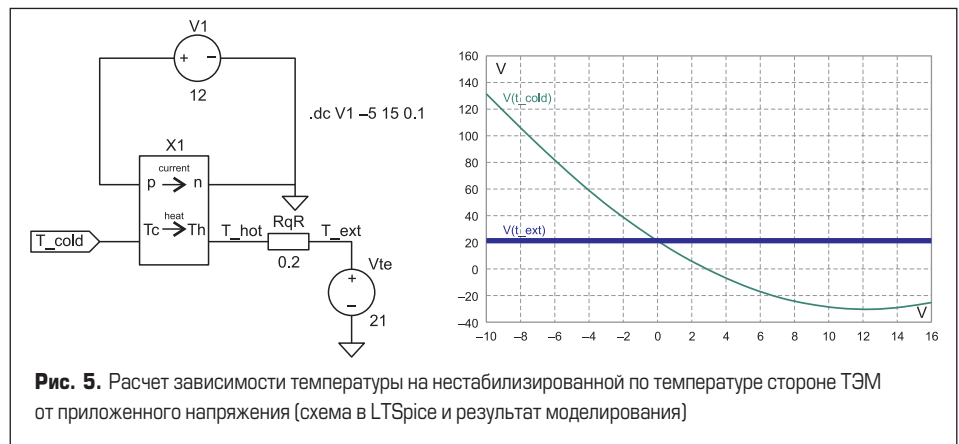
Для оценки динамических характеристик ТЭМ-модуля добавлены параметры C_q — теплоемкость ТЭМ; R_q — термосопротивление ТЭМ.

Проверка модели для типичного ТЭМ

Проведем проверку модели для популярного ТЭМ ТВ-127-1.4-1.5 (Ecogen) [3]. Для данного модуля параметры оцениваются таким образом:

- электрические: $S_e = 45$ мВ/К, $R_0 = 3$ Ом,
- тепловые: $C_q = 15$ Дж/К, $R_q = 3$ К/Вт.

Проверим зависимость температуры на нестабилизированной по температуре стороне ТЭМ от приложенного напряжения. При подаче электрического напряжения в диапазоне



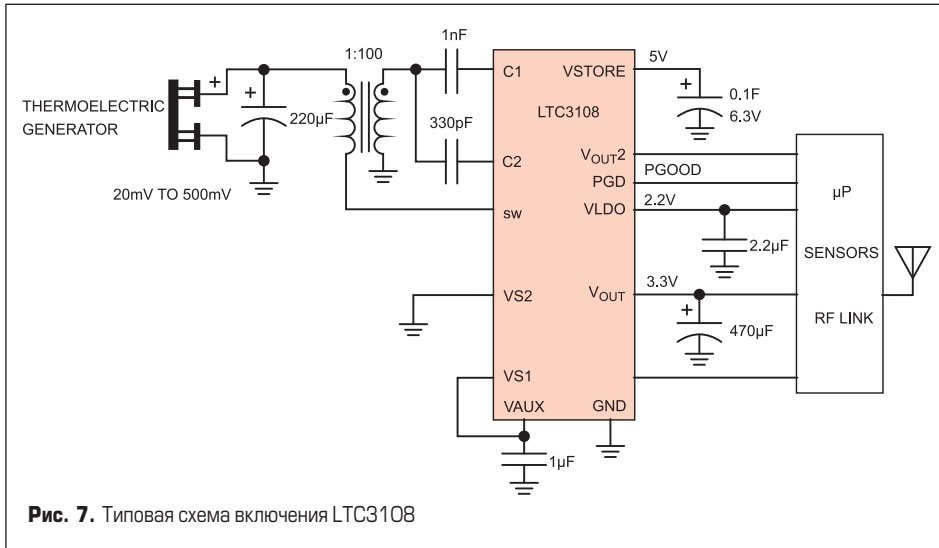


Рис. 7. Типовая схема включения LTC3108

-5...+15 В отчетливо виден минимальный уровень температуры на холодной стороне ТЭМ (-30 °С) (рис. 5.)

Другой тест модели — проверка мощности генерации энергии. Рассмотрим два состояния подключенного модуля: при замыкании выходов модуля сопротивлением

1 кОм — состоянии разорванной цепи (open circuit) и сопротивлением 1 МОм — состоянии короткого замыкания (short circuit). Схема включения модуля представлена на рис. 6.

По итогам проверки получены результаты, представленные в таблице. Таким образом,

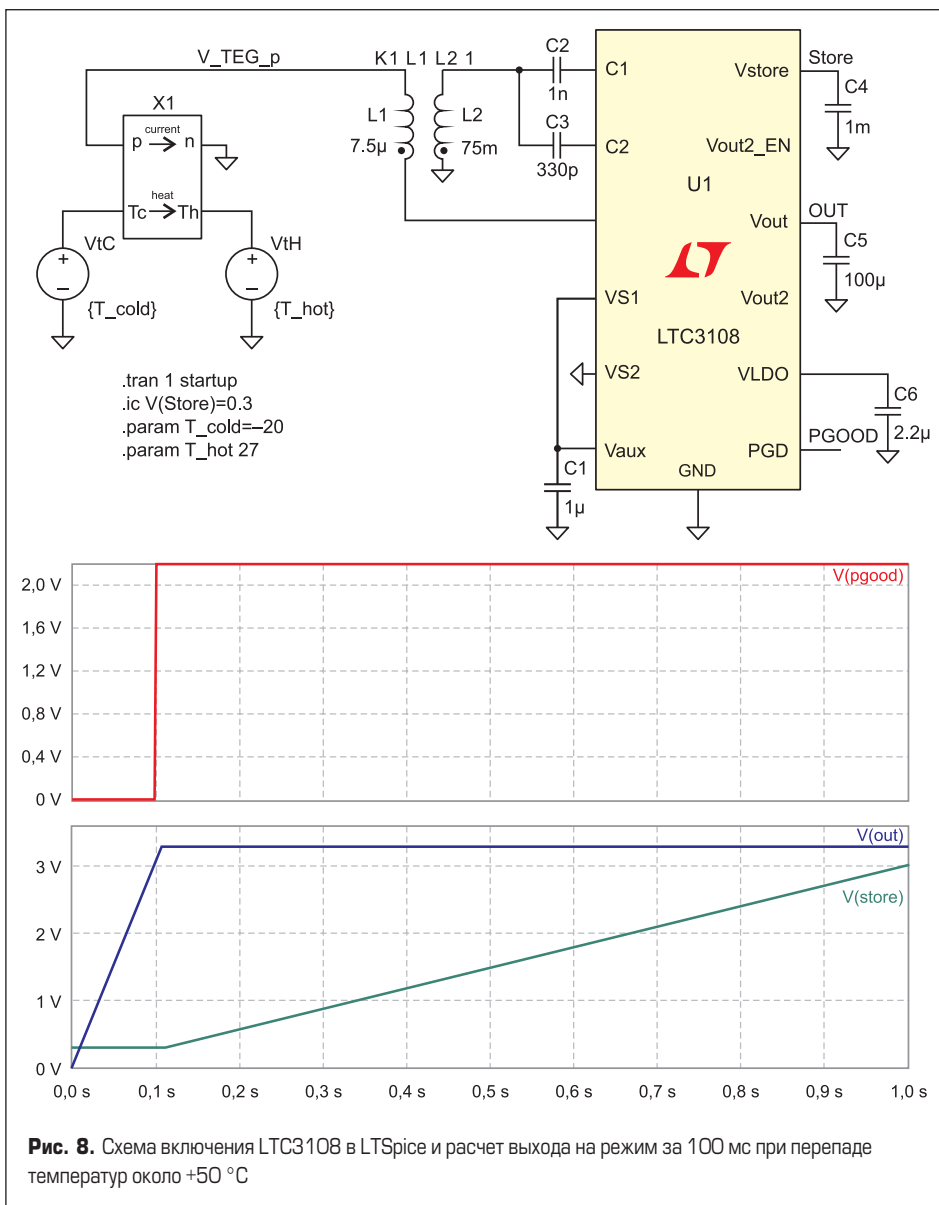


Рис. 8. Схема включения LTC3108 в LTSpice и расчет выхода на режим за 100 мс при перепаде температур около +50 °С

при $\Delta T = 110 - 23 = 87 \text{ }^\circ\text{C}$ максимальный ток КЗ может достигать 1,3 А, а напряжение на модуле — 3,9 В.

Примеры использования модели с регуляторами от Analog Devices

Моделирование генератора с ТЭМ и регулятором LTC3108

LTC3108 — это полноценная система генерации энергии от ТЭМ компании Analog Devices. Запуск генерации и функционирование при использовании данного компонента возможно от входных напряжений от 20 мВ. При этом LTC3108 обеспечивает заряд резервного аккумулятора и дополнительный выход LDO на напряжение 2,2 В и ток до 3 мА. Выходные напряжения системы с компонентом можно выбрать из набора фиксированных значений 2,35; 3,3; 4,1 или 5 В. LTC3108 имеет индикатор включения питания Power Good. Для системы требуется компактный повышающий трансформатор. LTC3108 зависит от градиента температур между границами ТЭМ. Если нужна система, не зависящая от температурной полярности, рекомендуется использовать LTC3109.

Генераторы т LTC3108/9 применяются в автономных датчиках и системах резервного питания.

В LTSpice имеется модель LTC3108, ее можно использовать вместе с предложенной моделью ТЭМ. Совместное моделирование позволяет рассчитать момент выхода на рабочий режим генератора с ТЭМ. Расчет полной цепочки генератора на ТЭМ дает возможность оценить работоспособность и мощность узла при различных температурных градиентах и параметрах термоэлектрического модуля. Расчет выхода на режим за 100 мс при перепаде температур около +50 °С представлен на рис. 8.

Моделирование стабилизатора температуры с LTM4663

LTM4663 представляет собой высоко интегрированный ТЭМ-контроллер в корпусе µModule. Данный контроллер работает по схеме стабилизации тока через ТЭМ, защищенной патентом компании Analog Devices. Стабилизация тока обеспечивается двумя каскадами регулирования: грубой, при помощи импульсной схемы регулирования, и тонкой, при помощи линейной схемы. Тонкая схема регулирования включает при приближении напряжения на ТЭМ в середине диапазона регулирования

Таблица. Результаты расчетов характеристик ТЭМ ТВ-127-1.4-1.5 в режимах ОС (разорванной цепи, open circuit), SC (короткого замыкания, short circuit) при различных перепадах температур

T_cold	T_hot	U_oc, В	I_sc, А
-5	23	1,03	0,34
110		3,9	1,3

напряжения. Контроль температуры осуществляется аналоговым методом путем подачи напряжения на вход TSET.

Системы с контроллерами LTM4663 активно используются при стабилизации температуры в оптических системах связи, медицинских и научных приборах.

Благодаря совместному использованию моделей ТЭМ и LTM4663 в LTSpice можно рассчитать сценарии управления температурой на ТЭМ при помощи аналогового входа TSET (рис. 9). При известных динамических характеристиках термоэлектрического модуля имеется возможность также оценить скорость установки температуры на регулируемой стороне ТЭМ.

Выводы

В статье представлены возможности LTSpice при моделировании систем с термоэлектрическими модулями. Предложенные методы расчетов позволяют простым и удобным способом оценить динамику таких систем и получить важные выводы о совместном функционировании контроллеров и ТЭМ, работающих как в режиме генерации, так и в режиме охлаждения (стабилизации температуры).

Литература

1. Шостаковский П. Г. Современные решения термоэлектрического охлаждения для

радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // Компоненты и технологии. 2009. № 12.

2. Kubov V. LTSpice-model of Thermoelectric Peltier-Seebeck Element. IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology, 2016/
 3. www.ecogenthermoelectric.com/tb-127-1-4-1-5.html
 4. Документация и SPICE-модель контроллера LTC3108 на сайте Analog Devices. www.analog.com/en/products/ltc3108.html
 5. Документация и SPICE-модель контроллера LTM4663 на сайте Analog Devices. www.analog.com/en/products/ltm4663.html

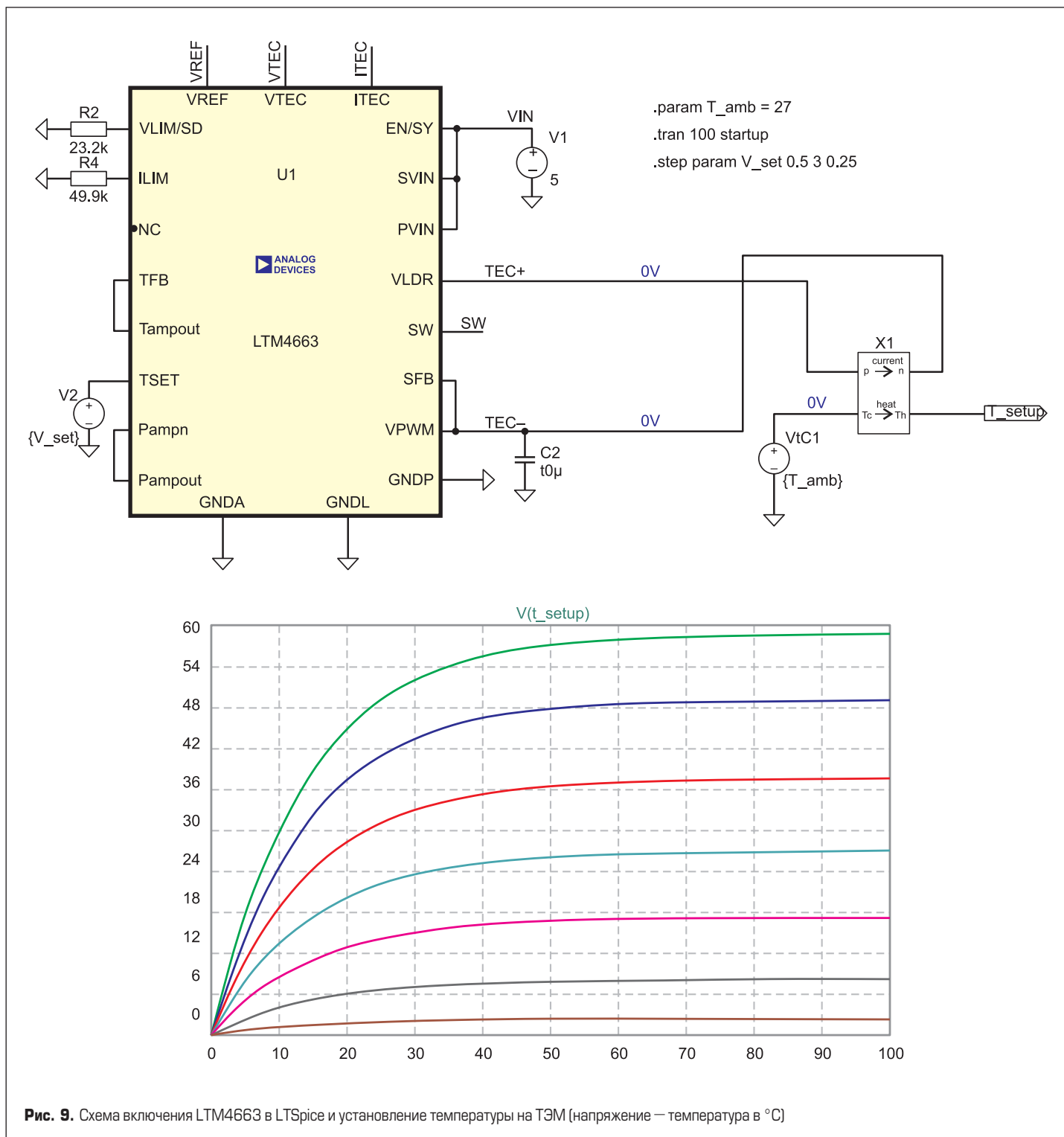


Рис. 9. Схема включения LTM4663 в LTSpice и установление температуры на ТЭМ (напряжение — температура в °C)