

С.А. Амелин, М.А. Амелина
(г. Смоленск, филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)
S.A. Amelin, M.A. Amelina
(Smolensk, Smolensk Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute»)

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЕМКОСТИ МОП-ТРАНЗИСТОРА

CREATING MOSFET NONLINEAR CAPACITANCE MODEL

Рассмотрены проблемы создания модели нелинейной емкости затвор-сток МОП-транзистора, предложена схема измерения этой емкости в области отрицательных напряжений сток-затвор, построена зависимость емкости затвор-сток от напряжения для транзистора IRF540N и предложена аппроксимирующая функция, которую можно использовать при создании модели МОП-транзистора.

The problems of model creating for nonlinear gate-drain capacitance of MOSFET are considered. A circuit is proposed for measuring this capacitance in the region of negative drain-gate voltages. The dependence of the gate-drain capacitance on voltage for the IRF540N transistor is constructed and an approximating function that can be used to create a model of a MOS-transistor is proposed.

Ключевые слова: МОП-транзистор, емкость затвор-сток, измерительный RLC-мост, экспоненциальная функция.

Keywords: MOSFET, gate-drain capacitance, measuring RLC bridge, exponential function.

Для моделирования коммутационных процессов в цепях импульсных источников электропитания, как правило, используются специализированные программы схемотехнического моделирования: *OrCAD*, *Micro-Cap*, *LTspice*, *Multisim*. Однако существующие модели современных короткоканальных МОП-транзисторов не всегда обеспечивают приемлемую точность моделирования. Это связано с тем, что при создании моделей для программ схемотехнического моделирования приходится идти на компромисс между точностью и приемлемым для практических применений временем расчета. Поэтому создание моделей МОП-транзисторов, повышающих точность моделирования без существенного увеличения времени расчета является актуальной задачей [1].

При анализе коммутационных процессов в цепях с короткоканальным МОП-транзистором на точность в наибольшей степени влияет нелинейный характер его паразитных емкостей [2], и в первую очередь — емкости затвор-сток C_{GD} (проходной емкости). Одна из существенных проблем

создания аппроксимирующих функций зависимости величины этой емкости от напряжения сток-затвор V_{DG} состоит в том, что фирмы-производители транзисторов не приводят график этой зависимости в справочных данных на свою продукцию. В области положительных значений V_{DG} для построения аппроксимирующих функций можно воспользоваться графиком зависимости проходной емкости C_{RSS} от напряжения сток исток V_{DS} , поскольку C_{RSS} это и есть C_{GD} , а при нулевом напряжении на затворе, при котором получен этот график, напряжение V_{DG} равно V_{DS} . Однако поведение этой емкости при напряжениях V_{DG} меньше 1 В неизвестно.

Таким образом, создание аппроксимирующей функции для емкости затвор-сток C_{GD} невозможно без получения дополнительных экспериментальных данных, т.е. графика зависимости емкости затвор-сток от напряжения на этой емкости в области отрицательных напряжений.

В свою очередь, получение этой экспериментальной зависимости затруднено, поскольку методика и схемы измерения проходной емкости (рис. 1), представленные в *Application Notes AN-957. Measuring HEXFET Characteristics*, распространяемой фирмой *International Rectifier* (ныне *Infineon*) и фактически ставшие стандартом измерения параметров МОП-транзистора, не предоставляют возможности измерения емкости при таких значениях напряжений.

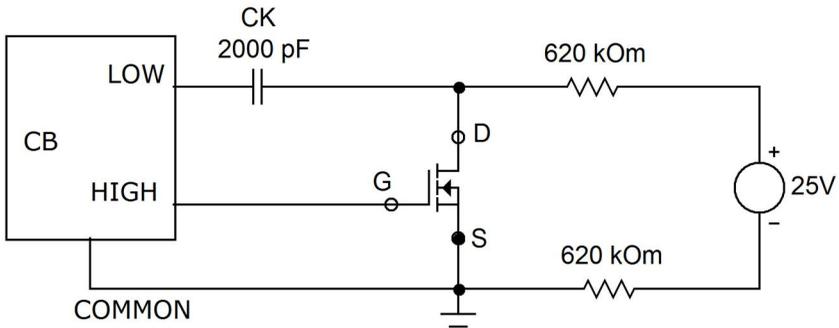


Рис. 1. Схема измерения проходной емкости C_{RSS} мостовым методом

В связи с этим необходима разработка новой схемы измерения. При этом источник смещения сток-исток не нужен (рис. 2), поскольку это напряжение при измерении емкости на рассматриваемом участке можно (и нужно) установить равным нулю. Однако непосредственное соединение стока и истока нарушит работу измерительного моста, поэтому сток и исток нужно соединить через индуктивность или сопротивление достаточно большой величины (сотни кОм).

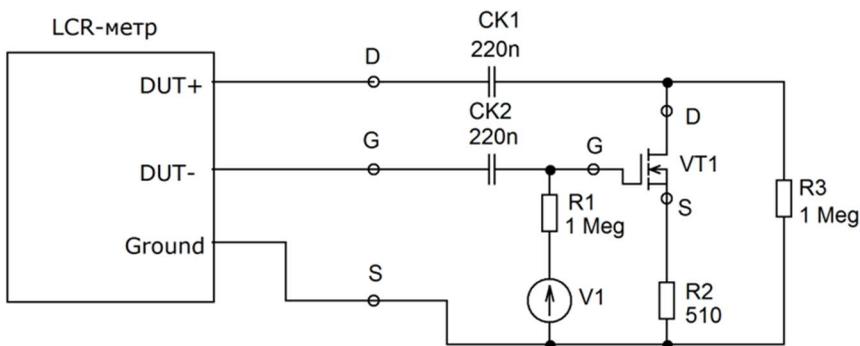


Рис. 2. Схема измерения проходной емкости при отрицательном напряжении сток–затвор

Кроме того, схему нужно дополнить источником напряжения, задающим положительный потенциал затвора. Чтобы измерительный мост не шунтировался малым сопротивлением канала при напряжениях затвор–сток выше порогового, в цепь истока включен резистор сопротивлением 510 Ом.

Для оценки возможности измерения проходной емкости по схеме рис. 2 необходимо провести схемотехническое моделирование, поскольку заранее неизвестно поведение измерительного моста в нестандартной схеме измерений. Для этого в программе схемотехнического моделирования Micro-Cap была реализована эквивалентная схема измерительного моста и на его основе создана модель схемы измерения проходной емкости (рис. 3).

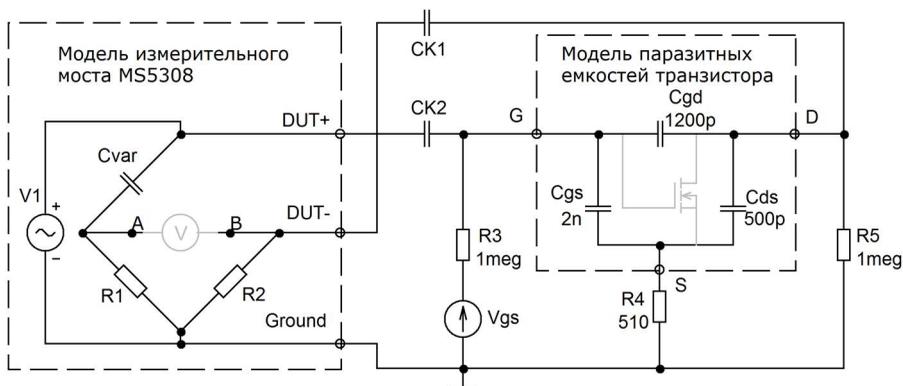


Рис. 3. Эквивалентная схема для моделирования измерения проходной емкости

Изменением емкости конденсатора C_{VAR} проводилась балансировка моста. Индикатором балансировки выступало минимальное значение напряжения между точками *A* и *B* (рис. 4).

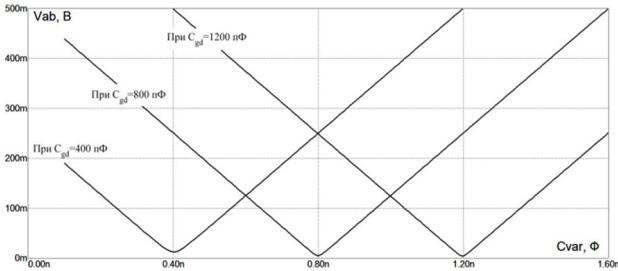


Рис. 4. Зависимость амплитуды напряжения U_{AB} от емкости конденсатора C_{var}

На основе схемы рис. 3 была реализована схема измерений с использованием измерительного моста *MS5308*. Измерения проводились для МОП-транзистора *IRF540N*. Результаты измерений показали, что результат измерения проходной емкости при нулевом напряжении на затворе получился тот же, что и при измерении по схеме рис. 2, т.е. схемы эквивалентны. Затем с помощью предложенной схемы измерения были измерены значения проходной емкости при отрицательных напряжениях сток-затвор. Результаты измерений показали, что в диапазоне напряжений V_{DG} от 0 до $-3,5$ В зависимость емкости от напряжения является продолжением зависимости при положительных напряжениях V_{DG} и может описываться той же аппроксимирующей функцией. А при напряжении ниже -4 В наблюдается участок ограничения и значение емкости становится практически постоянным (рис. 5).

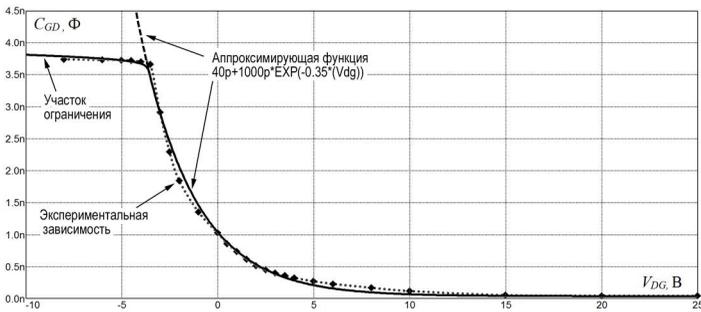


Рис. 5. Зависимость емкости затвор-сток C_{GD} от напряжения сток-затвор V_{DG}

Полученная экспериментальная зависимость хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией. В формате программы *Micro-Cap* функция будет иметь следующий вид: $40p+1000p*EXP(-0.35*(V(DG)))$.

Однако экспоненциальная функция не учитывает ограничение. При построении модели МОП-транзистора это ограничение можно учесть, введя в схему простейший диодный ограничитель с порогом ограничения -4 В, который будет ограничивать дальнейший рост напряжения $V(DG)$. Такая

модель нелинейной емкости обеспечивает высокую точность вычисления проходной емкости C_{DS} во всем диапазоне рабочих напряжений V_{DG} МОП-транзистора и может быть использована для создания его точных моделей.

Модель легко может быть реализована в виде подсхемы *Micro-Cap*, что в совокупности с простотой расчета параметров позволяет создавать библиотеки моделей МОП-транзисторов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-00148 А «Разработка оптимального алгоритма определения системы параметров полупроводниковых приборов на основе МОП-структур с целью формирования их математических SPICE-моделей».

Список литературы

1. Конюшенко, И. Основы устройства и применения силовых МОП-транзисторов (MOSFET) // Силовая электроника. – 2011. – № 2. – С. 10–14.

2. Амелин, С.А. Разновидности SPICE-моделей транзисторов с изолированным затвором/ С.А. Амелин, М.А. Амелина // Энергетика, информатика, инновации – 2017: сб. трудов VII-ой Межд. науч.-техн. конф.: в 3 т. Т. 2. – С. 15–20.

Материал поступил в редколлегию 08.10.19.

DOI: 10.30987/conferencearticle_5e028212ecf399.80444208

УДК 621.314

С.А. Амелин, К.О. Киселев

(г. Смоленск, филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)

S.A. Amelin, K.O. Kiselev

(Smolensk, Smolensk Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute»)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДОВ НА РАБОТУ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

MODELING THE INFLUENCE OF PARASITIC RESISTANCE OF WIRES ON THE WORK OF A WIND POWER INSTALLATION

Рассмотрен способ повышения энергоэффективности ветроэнергетической установки, основанный на получении оптимальной входной ВАХ промежуточного DC-DC конвертора с использованием усовершенствованной модели ветрогенератора, учитывавшей сопротивление токоведущих проводников.

A method for increasing the energy efficiency of a wind power installation based on obtaining the optimal input I–V characteristic of an intermediate DC-DC converter using an improved model of a wind generator that takes into account the resistance of current-carrying conductors is considered.

Ключевые слова: точка максимальной мощности, внутреннее сопротивление генератора, сопротивление проводов, математическая