

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*

модель, входная вольт-амперная характеристика.

*Keywords: maximum power point, internal generator resistance, wire resistance, mathematical model, input current-voltage characteristic.*

Для исследования способов согласования ветрогенератора (ВГ) с нагрузкой и обеспечения его работы в точке максимальной мощности необходимо создать его математическую модель. Как было показано в [1, 2] простейшая модель ВГ может быть описана системой уравнений:

$$\overline{M(f, V)} = \begin{cases} C_{P\max} - \frac{C_{P\max}}{Z(Z_{\max} - Z_H)^2} (Z - Z_H)^2, & \text{при } Z > Z_H \\ C_{P\max} \frac{Z}{Z_H^2} \left( -2 \frac{Z}{Z_H} + 3 \right), & \text{при } Z < Z_H \end{cases}$$

$M(f, V)$  это зависимость доступного на валу ВГ момента  $M$  от быстроходности работы ВГ. При этом быстроходность пропорциональна выходному напряжению ВГ и обратно пропорциональна скорости ветра, а момент на валу пропорционален доступному току. Пример выходной характеристики ВГ, полученной по представленной модели, приведен на рис. 1.

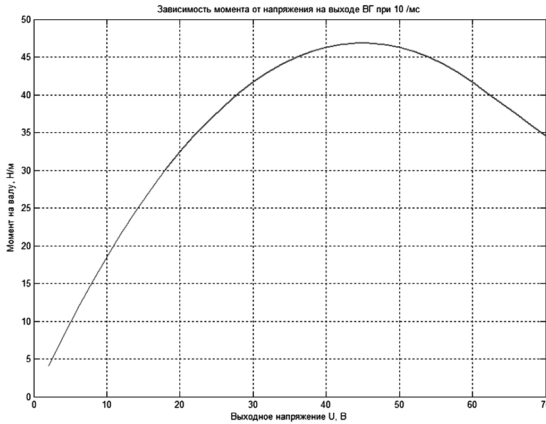


Рис. 1. Выходная характеристика ВГ

Однако эта модель не учитывает влияние внутреннего сопротивления проводников, соединяющих ВГ и аккумуляторную батарею (АКБ). Для токов ВГ порядка 20–40 А это сопротивление может оказывать существенное влияние на характеристики ВГ. При сечении проводников 6 мм<sup>2</sup> и работе с выпрямителем по схеме Ларионова при длине кабеля 40 м сопротивление проводов будет иметь величину порядка 0,25 Ом. Кроме того, необходимо еще учесть внутреннее сопротивление генератора ВГ и скользящего контакта на мачте ВГ. Теоретическая оценка величины этих сопротивлений

затруднена, поэтому при создании модели на первом этапе общее внутреннее сопротивление принято равным 1 Ом.

Как показало компьютерное моделирование, учет внутреннего сопротивления существенно сказывается на полученных характеристиках (рис. 2). Таким образом учет сопротивления проводов при создании математической модели ВГ является актуальной задачей.

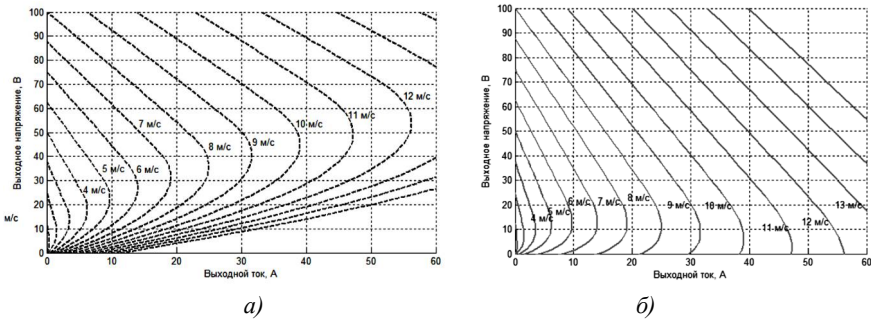


Рис. 2. Выходные ВАХ при различных скоростях ветра:

а – без учета сопротивления проводов; б – с учётом сопротивления проводов

При использовании модели, учитывающей сопротивление проводников, общая форма выходной характеристики ВГ при этом сохраняется, но существенно меняются численные значения. Следовательно, для работы в точке максимальной мощности необходимо по-другому подстраивать входную ВАХ промежуточного преобразователя, который является нагрузкой для ВГ. Вид этой ВАХ можно получить, решив уравнение баланса мощностей:

$$P_g(U_L) = P_L(U_L) + P_w(U_L),$$

где  $P_g(U_L)$  – выходная характеристика ветрогенератора,  $P_L(U_L)$  – входная характеристика нагрузки,  $P_w(U_L)$  – мощность потерь в проводах,  $U_L$  – напряжение на нагрузке.

Решением будет система уравнений:

$$\begin{cases} I_1(U) = -\frac{U}{R_w} \\ I_2(U) = \frac{\frac{1 + \sqrt{1 - 4a \cdot R_w \cdot U}}{2} - a \cdot R_w \cdot U}{a \cdot R_w^2} \\ I_3(U) = \frac{\frac{1 - \sqrt{1 - 4a \cdot R_w \cdot U}}{2} - a \cdot R_w \cdot U}{a \cdot R_w^2} \end{cases}$$

где  $R_w$  общее сопротивление подводящих проводников, Ом.

Зависимость  $I_1(U)$  интереса не представляет, т.к. описывает ВАХ, когда генератор является потребителем. Зависимости  $I_2(U)$  и  $I_3(U)$  описывают интересующую ВАХ нагрузки, когда от ВГУ будет потребляться полная доступная мощность. Приняв  $R_{\text{пр}}=0,5$  Ом и  $a=0,011$ , получим один из вариантов ВАХ (рис. 3).

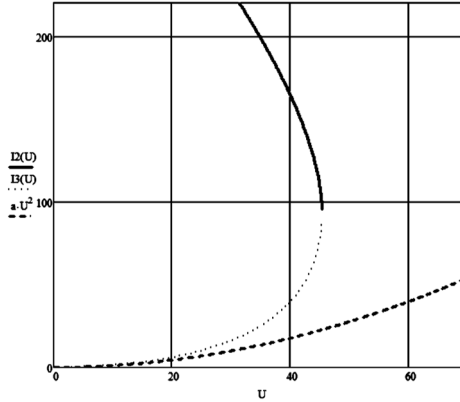


Рис. 3. Требуемая входная ВАХ нагрузки

Зависимость  $I_2(U)$  хоть и является теоретически справедливой, но в реальных условиях начало работы на этом участке возможно лишь при чрезмерно высоких скоростях ветра и частотах вращения ВГУ, что по сути является аварийной ситуацией и на это время ВГ должен быть остановлен. Соответственно только кривая  $I_3(U)$  является практически значимой зависимостью, которая обеспечит максимальное потребление мощности от ВГ с учетом потерь в проводах. Полученный результат хорошо совпадает с ранее экспериментально подобранной ВАХ нагрузки (рис. 4).

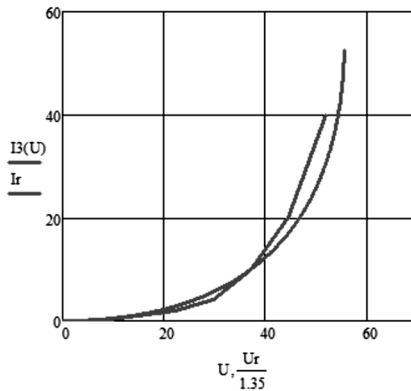


Рис. 4. Теоретически рассчитанная и экспериментально подобранные входные ВАХ нагрузки

Таким образом, зависимость  $I_3(U)$  дополняет упрощенную модель ветрогенератора, повышая её адекватность.

Эффективность ВГ можно оценивать по параметру  $K$  в формуле  $P(V)=K \cdot V^3$  [2], т. к. этот параметр зависит только от геометрических параметров ВГ, которые не изменяются у ветрогенераторов с фиксированными лопастями. Т.е. сравнивая этот параметр для одного и того же генератора можно оценивать насколько полно потребляется энергия ветра. Используя аппроксимацию измеренных зависимостей  $P(V)$  получим значения  $K$ .

Без использования корректировки ВАХ нагрузки (нагрузка — выпрямитель Ларионова, нагруженный на АКБ напряжением 48 В) получается  $K=0,56$  (рис. 5, а). При применении в качестве нагрузки DC-DC преобразователя напряжения с полученной выше оптимальной ВАХ параметр  $K_K$  достигает значения 0,96 (рис. 5, б). Т.е. с использованием усовершенствованной модели ВГ удалось получить прирост эффективности на 71 %, что эквивалентно 71 % увеличению средней выработки электроэнергии.

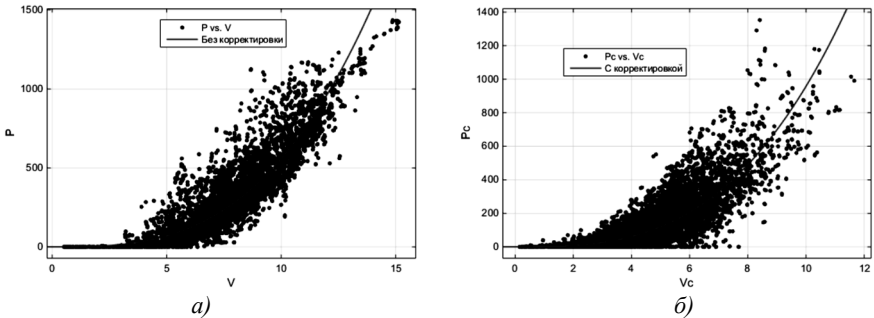


Рис. 5. Теоретические и экспериментальные зависимости  $P(V)$ :

а — без корректировки ВАХ нагрузки  $K=0,56$ ; с корректором ВАХ нагрузки  $K_K=0,96$

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-07-00304 А «Исследование методов повышения энергоэффективности устройств комбинированного электропитания автономных систем связи и радиолокации».*

### Список литературы

1. Киселев, К.О. Анализ выходной ВАХ и эффективности использования ветрогенератора/ К.О. Киселев, О.А. Фролков // Энергетика, информатика, инновации-2014: материалы 4-й междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов – СФ МЭИ, 2014. – С. 342.
2. Киселев, К.О. Анализ работы ветрогенератора на нагрузку с противо-ЭДС //Интеллектуальные энергосистемы: сб. материалов II междунар. молодежного форума. – ТПУ (ЭИ), 2014. – С. 127.

*Материал поступил в редколлегию 08.10.19.*