
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.317

А. А. УСОЛЬЦЕВ, Д. В. ЛУКИЧЁВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО СПРАВОЧНЫМ ДАННЫМ

Предложена методика определения параметров схемы замещения асинхронного короткозамкнутого двигателя, обеспечивающая соответствие расчетных координат механической характеристики справочным данным.

Ключевые слова: модель асинхронного короткозамкнутого двигателя, методика определения, параметры модели.

Стремительное развитие вычислительной техники в последние десятилетия привело к тому, что математическое моделирование электромагнитных и электромеханических процессов с помощью различных программных средств обрело статус инженерной методики. В то же время в справочных изданиях отсутствуют данные, необходимые для построения моделей электрических машин, так как эта литература ориентирована на совершенно иные задачи и методы решения. Особенно актуальна эта проблема для асинхронных машин, поскольку именно они в последнее время вытесняют другие типы двигателей из традиционных для них областей приводов среднего и высокого качества, разработка которых без моделирования процессов принципиально невозможна. При этом в технической литературе параметры асинхронных двигателей (АД) встречаются либо в виде совокупности данных (без указания метода их определения) для ограниченного списка машин [1], либо в виде не всегда обоснованных, а потому приводящих к существенным погрешностям, формул для вычисления искомых параметров [2]. Кроме того, справочные данные часто противоречивы, т.е. приводимые в них электрические, механические и энергетические параметры не всегда согласуются друг с другом, поэтому расчет с использованием смешанного исходного набора также приводит к недостоверным результатам. Целью настоящей статьи является разработка методики определения параметров схемы замещения АД, обеспечивающей сходимость результатов расчета к справочным параметрам механической характеристики (МХ).

В справочной литературе по асинхронным двигателям всегда приводятся значения следующих параметров, соответствующие номинальному режиму работы:

- мощность $P_{\text{ном}}$, Вт;
- линейное или фазное напряжение питания $U_{\text{ном}}$, В;
- фазный ток $I_{\text{ном}}$, А;
- скорость вращения n , об/мин или скольжение $s_{\text{ном}}$;
- коэффициент мощности $\cos\varphi$;
- кратность максимального момента $\lambda = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$.

По этим данным с приемлемой для инженерной практики точностью можно определить параметры схемы замещения (рис. 1, а).

Практика моделирования электромагнитных и электромеханических процессов в системах привода с АД показывает, что параметры схемы замещения, приведенные в справочных данных [1, 2], не позволяют получить МХ, проходящей через точки, определяемые этими данными. В то же время для пользователя АД она представляет основной интерес, поскольку определяет характер механических процессов в приводе. Поэтому в основу методики расчета положим уравнение МХ АД в форме Клосса

$$\frac{M_{\text{ном}}}{M_{\text{max}}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{2(1 + as_{\text{max}})}{s_{\text{ном}}/s_{\text{max}} + s_{\text{max}}/s_{\text{ном}} + 2as_{\text{max}}}$$

В этом выражении неизвестны два параметра: $a = r_1/c_1r'_2$ и критическое скольжение s_{max} . Задавшись некоторым значением a , можно найти критическое скольжение

$$s_{\text{max}} = \frac{s_{\text{ном}}}{A} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - A} \right), \tag{1}$$

где $A = 1 - 2as_{\text{ном}}(\lambda - 1)$, т.е. значение a определяет ординату точки опрокидывания, а абсциссу этой точки определяет значение λ (рис. 2. Здесь 1 — $a = 0,2$; 2 — 1,5; 3 — 3,2; рис. 2, a — для $P_{\text{ном}} = 60$ Вт, b — для 30 кВт). Увеличение a приводит к возрастанию критического скольжения, однако при этом все МХ проходят через точку номинального режима, заданную справочными данными, и практически совпадают друг с другом при скольжении меньше номинального. (Максимальное расхождение характеристик соответствует половине номинального скольжения и при $a = 0,2-3,2$ составляет около 10 % для АД мощностью 60 Вт и менее 1 % — у машин мощностью более 3 кВт.) В то же время коэффициент a определяет соотношение между важнейшими параметрами схемы замещения АД и тем самым влияет на все остальные параметры.

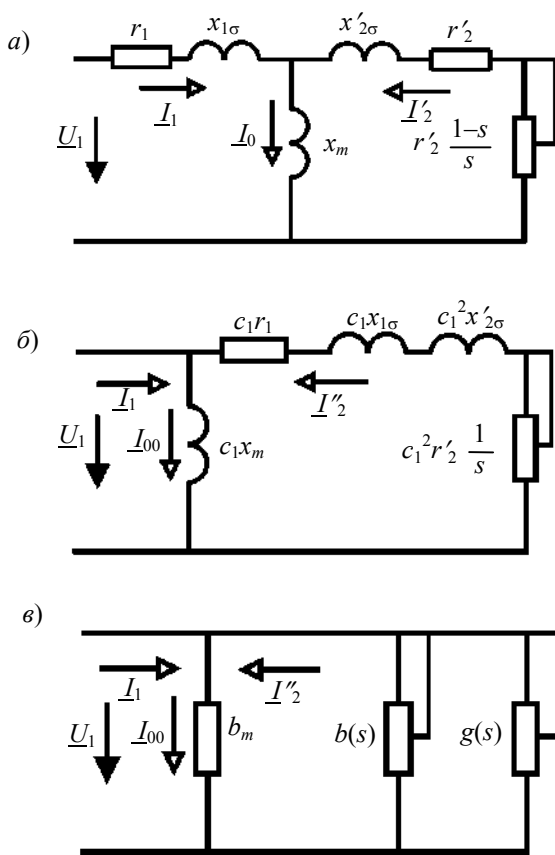


Рис. 1

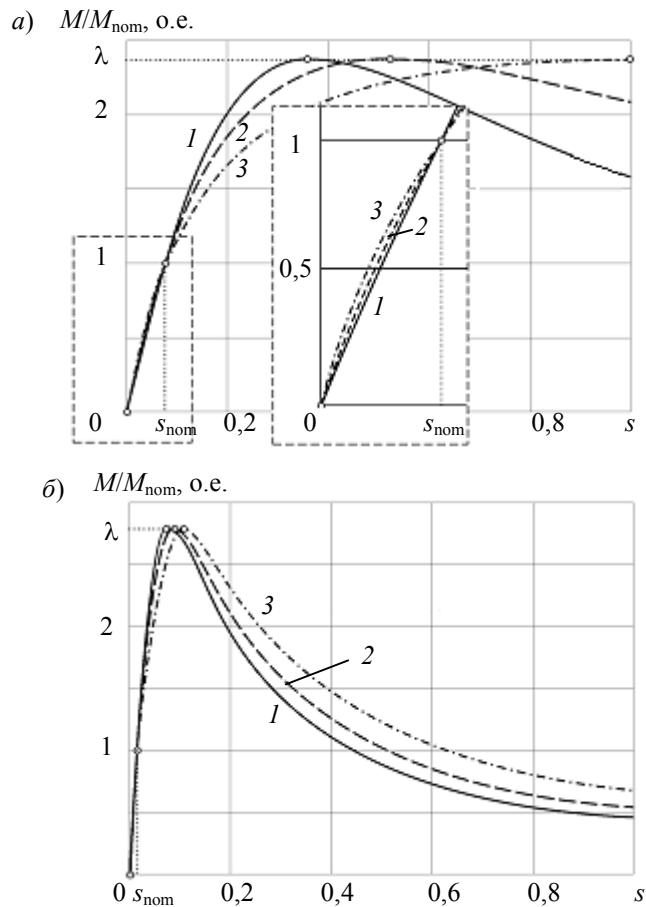


Рис. 2

Входящий в a коэффициент преобразования схемы замещения

$$c_1 = \left| 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_m} \right| \approx 1 + x_{1\sigma} / x_m \quad (2)$$

зависит от мощности и находится в диапазоне $1,02 < c_1 < 1,2$. Верхняя граница значений соответствует мощности АД в несколько десятков ватт, а нижняя — в несколько десятков и сотен киловатт.

Из выражения для критического скольжения можно определить величину

$$\sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma} + c_1 x'_{2\sigma})^2} = \frac{c_1 r'_2}{s_{\max}} = \frac{r_1}{as_{\max}}$$

и подставить ее в уравнение максимального момента АД в режиме двигателя, тогда

$$M_{\max} = \lambda M_{\text{ном}} = \frac{B}{r_1 \left(1 + \frac{1}{as_{\max}} \right)},$$

где $B = \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 c_1}$; $M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\Omega_1 (1 - s_{\text{ном}})}$ — номинальный вращающий момент АД с числом пар полюсов z_p магнитного поля, если $\Omega_1 = 2\pi f_1 / z_p$ — скорость идеального холостого хода, а m_1 и U_1 — число фаз и фазное напряжение питания статора.

Отсюда можно определить все параметры схемы замещения, кроме индуктивного сопротивления основного магнитного потока

$$r_1 = \frac{B}{\lambda M_{\text{ном}} \left(1 + \frac{1}{as_{\max}} \right)}; \quad r'_2 = \frac{r_1}{c_1 a}; \quad (3)$$

$$x_k = x_{1\sigma} + c_1 x'_{2\sigma} = \frac{r_1}{as_{\max}} \sqrt{1 - (as_{\max})^2}.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания x_k можно разделить на сопротивление потоков рассеяния статора и ротора $x_{1\sigma}$ и $x'_{2\sigma}$, руководствуясь известными из практики соотношениями (обычно это делают простым делением на 2 [2—4]). Однако на основании данных [1] лучше использовать соотношение $x'_{2\sigma} \approx c_1 x_{1\sigma}$, тогда

$$x_{1\sigma} = \frac{x_k}{1 + c_1^2}; \quad x'_{2\sigma} = \frac{x_k - x_{1\sigma}}{c_1} = \frac{c_1 x_k}{1 + c_1^2}. \quad (4)$$

Такое распределение существенно отличается от приближенного равенства $x'_{2\sigma} \approx x_{1\sigma}$ только при малых мощностях АД.

Последним подлежащим определению параметром является индуктивное сопротивление цепи намагничивания x_m . Чтобы при решении этой задачи не использовать каких-либо допущений, преобразуем последовательное соединение главной цепи схемы (рис. 1, б) в параллельное, выделив активную, $g(s)$, и реактивную, $b(s)$, составляющие комплексной проводимости (рис. 1, в)

$$g(s) = \frac{r_1 + c_1 r_2' / s}{c_1 \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + x_k^2 \right]}; \quad b(s) = \frac{x_k}{c_1 \left[(r_1 + c_1 r_2' / s)^2 + x_k^2 \right]}. \quad (5)$$

Значение x_m слабо влияет на электромеханические процессы и входит в уравнение механической характеристики АД только посредством коэффициента c_1 . В то же время проводимость ветви намагничивания $1/x_m$ в режимах, близких к номинальному, соизмерима с реактивной проводимостью главной цепи $b(s)$ и существенно влияет на энергетические параметры. Поэтому ее целесообразно определять из баланса реактивной мощности

$$Q_1 = Q_k + Q_m = U_1 I_{\text{ном}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi},$$

где Q_k, Q_m — реактивная мощность, расходуемая на формирование полей рассеяния статора и ротора и основного магнитного поля соответственно. После преобразования главной цепи мощность потоков рассеяния и основного потока может быть представлена через одинаковое для всех ветвей фазное напряжение U_1 как $Q_k = U_1^2 b(s_n)$ и $Q_m = U_1^2 b_m = U_1^2 / (c_1 x_m)$. Подставив эти выражения в уравнение баланса мощности, получим

$$x_m = \frac{1}{c_1 \left[I_{\text{ном}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} / U_1 - b(s_{\text{ном}}) \right]} = \frac{1}{I_{\text{ном}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} / U_1 - b(s_{\text{ном}})} - x_{1\sigma}. \quad (6)$$

Таким образом, из шести исходных параметров получены все искомые в виде функций коэффициента a , изменяющегося в пределах $0 < a < 1/s_{\text{max}}$. (Ограничение для выбора a вводится из условия получения вещественного значения x_k в выражении (3).) Следовательно, задача сводится к определению этого коэффициента, но по параметрам механической характеристики значение a можно однозначно определить, только если известно критическое скольжение. Однако значение s_{max} в справочной литературе не приводится, поэтому в расчете нужно создать какой-либо цикл с вариацией a и последующим выбором его оптимального значения. В качестве условия оптимизации более всего подходит сходимость расчетного значения тока статора в номинальном режиме $I'_{\text{ном}}$ к справочному значению $I_{\text{ном}}$, поскольку в случае их согласования будет обеспечено полное соответствие электрических и механических параметров. Некоторая сложность в расчете возникает из-за того, что коэффициент c_1 можно вычислить только после определения искомых параметров, и следовательно, требуется создание итерационного цикла с прерыванием по условию сходимости к установившемуся значению c_1 . Кроме того, заранее неизвестны диапазон изменения и характер функции отклонения $\delta_I = (I'_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}) / I_{\text{ном}} = f(a)$. Известно только, что при малых значениях a она отрицательна и для машин мощностью менее 1 кВт не изменяет своего знака, но имеет минимум. Для машин большей мощности функция $\delta_I = f(a)$ в диапазоне $0 < a < 1/s_{\text{max}}$ изменяет знак.

Поэтому для расчета был предложен алгоритм с двумя циклами типа „while“, приведенный на рис. 3. Внутренний цикл обеспечивает сходимость к установившемуся значению c_1 при $a = \text{const}$ и прерывается по условию $c_{1n} - c_{1(n-1)} \leq \Delta$. Прерывание наружного цикла может быть обусловлено

— выходом a за предел $a > 1/s_{\text{max}}$, что приводит к появлению мнимой составляющей в параметрах;

— обнаружением минимума функции отклонения $\delta_I = f(a)$;

— обнаружением смены знака функции $\delta_I = f(a)$.

Первое условие прерывания означает отсутствие признаков, обеспечивающих минимальную погрешность отклонения тока от номинального значения. В этом случае следует выбрать иной критерий оптимизации, но в расчетах по предлагаемой методике такая ситуация не возникла. Два других условия прерывания обеспечивают оптимальный выбор параметров АД.

Программа расчета по алгоритму рис. 3 легко реализуется в современных математических пакетах, например, MathCad или MathLab.

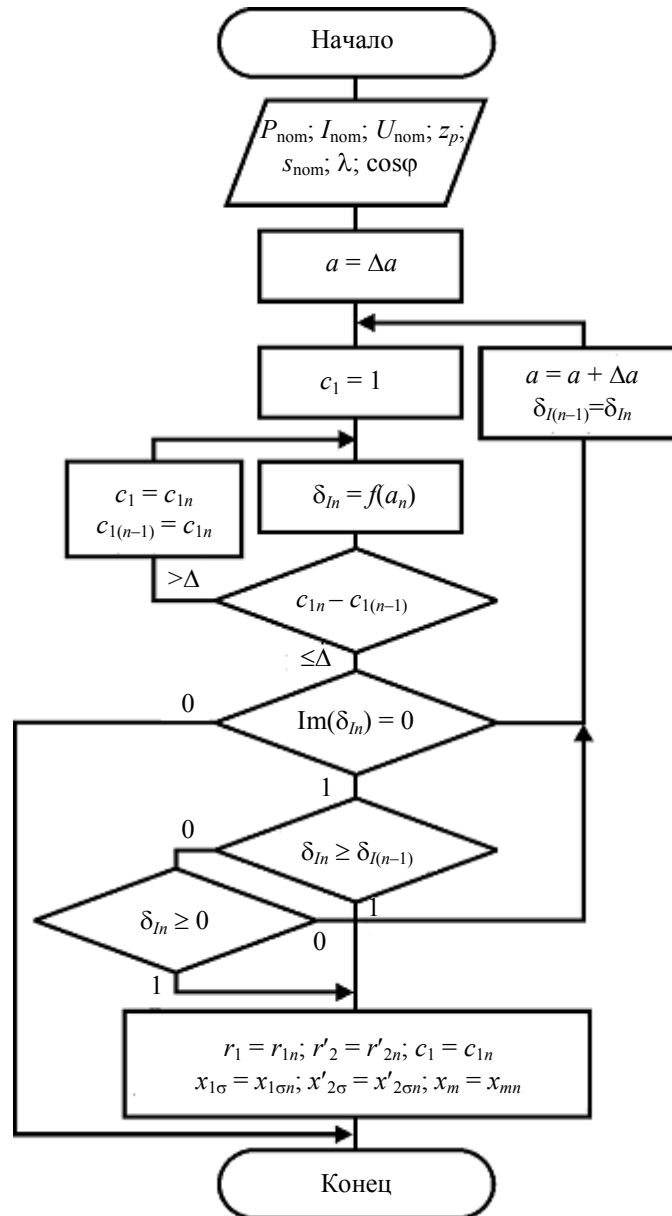


Рис. 3

Для оценки эффективности рассмотренной методики сопоставим полученные с ее помощью параметры схемы замещения АД с параметрами, полученными по методике [2], а также параметры, приведенные в [1, с. 302]. Причем сравнивать будем не сами параметры, так как истинное значение их неизвестно, а величины, получаемые из них расчетным путем и обычно приводимые в справочных данных. В качестве данных для сравнения выберем приведенные в [1]: максимальный и номинальный вращающий момент, номинальный ток и кратность пускового тока, а также коэффициенты мощности и полезного действия (рис. 4, 1 — по данным [1], 2 — по данным [2], 3 — предлагаемая методика). Расчет

токов и энергетических параметров будем проводить с помощью схемы (рис. 1, в), которая позволяет получить эти значения простейшим способом, не принимая каких-либо допущений.

Из анализа данных рис. 4 можно сделать следующие выводы.

1. Предлагаемая методика расчета параметров АД обеспечивает для всех машин полное соответствие координат характерных точек МХ справочным (исходным) данным, а также полное соответствие справочным значениям номинального тока, коэффициента мощности и КПД для двигателей мощностью выше 1 кВт. Для двигателей меньшей мощности возникает рассогласование со справочными данными, которое не может быть устранено подбором коэффициента a .

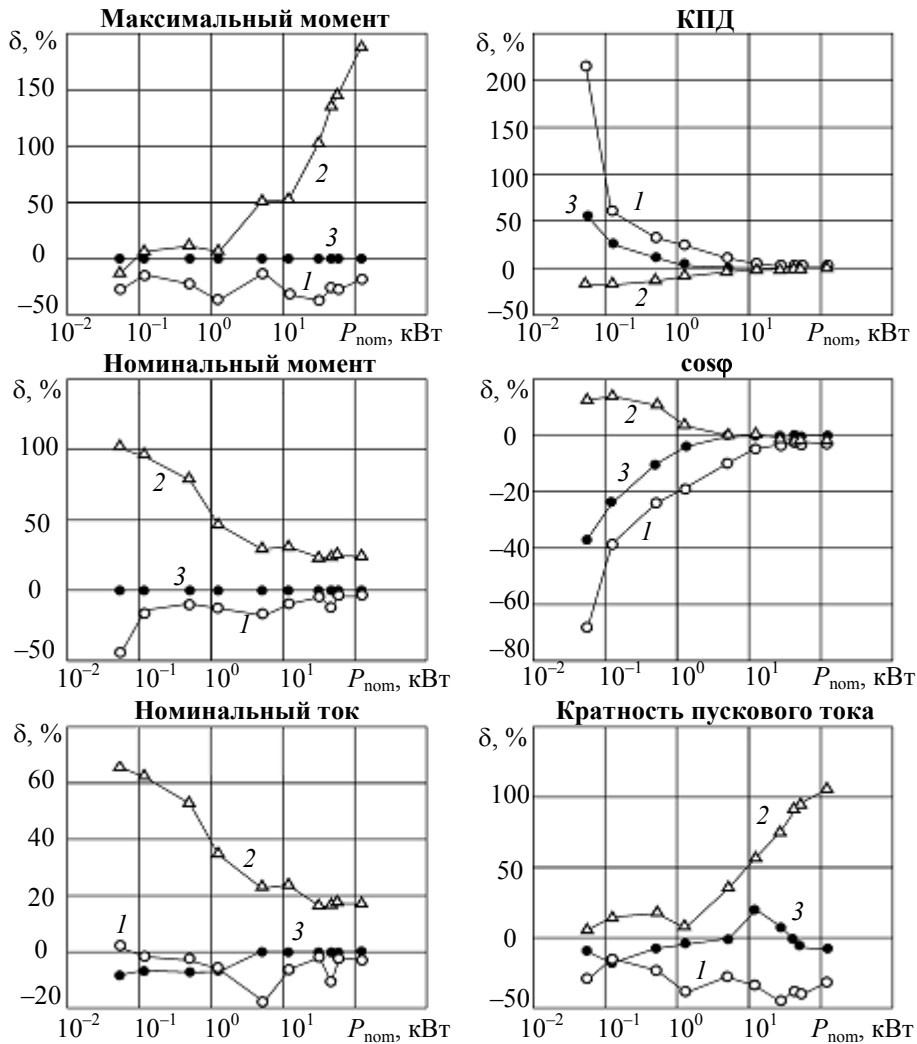


Рис. 4

2. У двигателей мощностью менее 1 кВт возникает отклонение расчетного номинального тока от справочного значения, не превышающее 10 %, что можно считать вполне допустимым, если учесть, что по ГОСТ 28173 (МЭК 60034-1) допуск на справочное значение пускового тока составляет +20 %, а номинального скольжения — ± 30 %. Причем ГОСТ устанавливает увеличенные в 1,5 раза допуски именно для машин мощностью менее 1 кВт.

3. Отклонения пускового тока от справочных значений в предлагаемой методике имеют случайный знакопеременный характер и не превышают 20 %. Существенные отклонения от справочных данных наблюдаются также при расчете пускового момента. Для АД мощностью более 1 кВт его значения занижены в 1,5—2 раза. Такое рассогласование можно объяснить несоответствием расчетной математической модели (рис. 1) реальной машине, для которой

приводятся справочные данные и в которой значительную роль играет явление вытеснения тока в стержнях ротора при пуске.

4. При расчете энергетических параметров (КПД и $\cos\phi$) АД мощностью менее 1 кВт наилучшее приближение к справочным значениям получается по данным методики [2]. Это вполне объяснимо, поскольку в ней все параметры схемы замещения определяются по энергетическим соотношениям. Однако для машин мощностью выше 1 кВт предлагаемая методика обеспечивает наилучший результат, так как ее отклонения не превышают 0,5 %.

Таким образом, разработанная методика определения параметров схемы замещения АД позволяет получить данные, существенно лучше согласующиеся со справочными значениями, а для МХ она обеспечивает наилучшее приближение на рабочем участке с нулевой погрешностью в точках номинального режима и опрокидывания. Вне рабочего участка эта методика, как и другие методики, использующие схему замещения рис. 1, приводит к значительной погрешности, в особенности в определении пускового момента (см. рис. 2). Следует заметить, что в [4, с. 170] рассогласование справочного и расчетного пускового момента устраняется простым принятием справочного значения, что создает необъяснимый разрыв МХ в области режима короткого замыкания.

Рассмотренная методика по сути является методикой интерполяции МХ по двум точкам, заданным справочными данными. Поэтому она успешно может использоваться и в задачах идентификации параметров схемы замещения по известным координатам МХ, полученным на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Уч. для вузов по спец. „Электро-механика“. М.: Высш. шк., 1994. 318 с.
2. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. СПб: КОРОНА-принт, 2003. 256 с.
3. Вольдек А. И. Электрические машины: Уч. для студентов высш. техн. учебн. заведений. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
4. Кацман М. М. Электрические машины: Уч. для уч-ся техникумов. М.: Высш. шк., 1990. 463 с.

Сведения об авторах

- Александр Анатольевич Усольцев** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
E-mail: uaa@nwgsu.ru
- Дмитрий Вячеславович Лукичёв** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики,
E-mail: ludimit@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
электротехники и прецизионных
электромеханических систем

Поступила в редакцию
23.01.08 г.