



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY



ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ- 2017

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ,
АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
“ПРОСПЕКТ СВОБОДНЫЙ 2017”
ПОСВЯЩЕННОЙ ГОДУ ЭКОЛОГИИ В РФ

КРАСНОЯРСК, СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

17-21 АПРЕЛЯ 2017 Г.

**Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»**

Проспект Свободный - 2017

Материалы научной конференции
посвященной Году экологии в Российской Федерации
17-21 апреля 2017 г.

Электронное издание

Красноярск
СФУ
2017 г.

**Электроэнергетика, электротехнологии,
электротехника и робототехника**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЮ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Кручинкин А.А.

Научный руководитель профессор Масальский Г. Б.

Сибирский федеральный университет

Для перемещения мобильного робота в пространстве $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ по заданной траектории, необходимо решить траекторную задачу. Этапы решения представлены на рисунке1.[1]

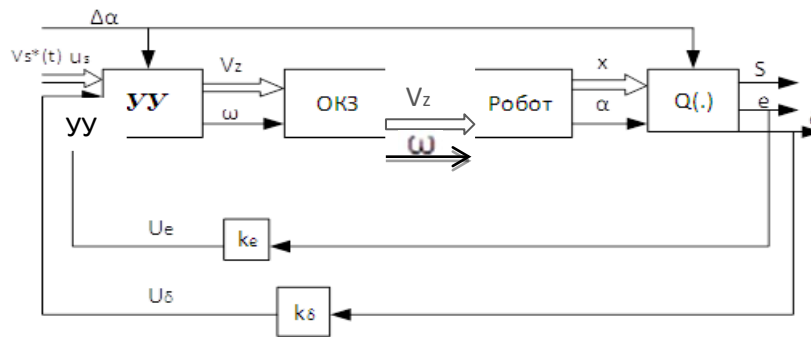


Рис. 1 – Функциональная схема системы управления кинематической моделью

Здесь УУ – устройство управления; ОКЗ – блок решения обратной кинематической задачи; Робот – кинематическая модель; S – траектория (трасса) мобильного робота; $V_s(t)$ – заданная продольная скорость по траектории S; $\Delta\alpha$ – заданная относительно оси x_1 ориентация мобильного робота; u_δ – угловое управление; e – поперечное отклонение траектории от кривой S (ошибка положения); δ – угловое отклонение (ошибка угловой ориентации); k_e, k_δ – коэффициенты отрицательной обратной связи; V_1 – вектор продольных скоростей первого и второго колеса робота; Q(.)- функция отклонение заданной(эталонной) и реальной траектории от S.

Реализация функциональной схемы в среде Matlab приведена на рисунке 2,

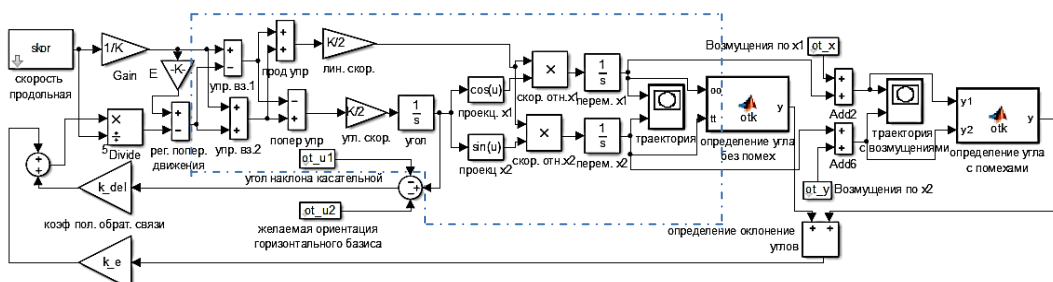


Рис. 2- Структурная схема замкнутой системы управления кинематической моделью

Дополнительные блоки позволяют находить управляющие сигналы $u_1(t), u_2(t)$, рассчитывающие движение по заданной траектории.

Продольное управление (формула (1)):

$$u_s(t) = \frac{1}{2}(u_1(t) + u_2(t)). \quad (1)$$

Локальный регулятор(формула (2)):

$$u_s(t) = \frac{1}{K}V_s^*(t). \quad (2)$$

Поперечное управление(формула (3)):

$$u_e(t) = -\frac{1}{2}(u_1(t) - u_2(t)). \quad (3)$$

Управляющие воздействия u_1 и u_2 (формула (4)):

$$u_1(t) = u_s(t) - u_e(t), \quad u_2(t) = u_s(t) + u_e(t). \quad (4)$$

Регулятор поперечного движения (формула (5)):

$$u_e(t) = \xi U_s(t) - \frac{k_e}{V_s^*} e(t) - \frac{k_\delta}{V_s^*} \delta(t) \quad (5)$$

где ξ - кривизна траектории.

Уравнения (2) – (5) описывают регуляторы мобильного робота. Зависимость (3) и (5) позволяют регулятору поперечного движения управлять поворотом мобильного робота. Аналогичным образом, линейная скорость мобильного робота управляется локальным регулятором (2). Блок продольной скорости формирует сигналы локального регулятора. Зависимости поперечного и продольного управления от регуляторов показаны на рисунке 3.

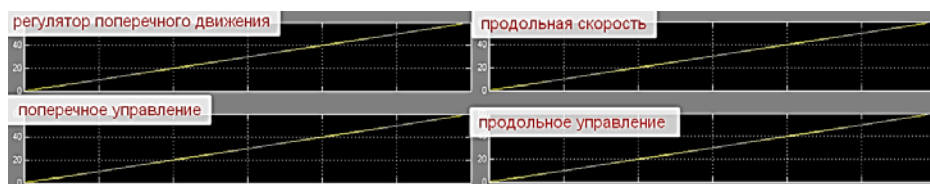


Рис. 3– Зависимость управлений от регуляторов

Угловая ориентация робота по отношению к траектории S определяется соотношением(формула (6)):

$$\alpha(t) = \alpha^*(t) + \Delta\alpha(t) \quad (6)$$

где α^* – угол наклона касательной $\alpha^*(s)$ в текущей точке $\mathbf{x}^c = (x_1^c, x_2^c)$ относительно оси x_1 ; $\Delta\alpha$ – желаемая ориентация горизонтального базиса $\tau_1(\alpha)$ мобильного робота относительно текущей траектории $\alpha^*(s)$, α – угол поворота (ориентации) робота относительно оси x_1 .

Ошибка угловой ориентации (формула (7)):

$$\delta(t) = \alpha(t) - \alpha^*(t) - \Delta\alpha(t) \quad (7)$$

Поворот робота зависит от поперечного управления u_e . На рисунке 4 показана зависимость поперечного управления u_e от угловой ориентации $\Delta\alpha$, основанной на уравнениях (2), (5), (6) и (7).

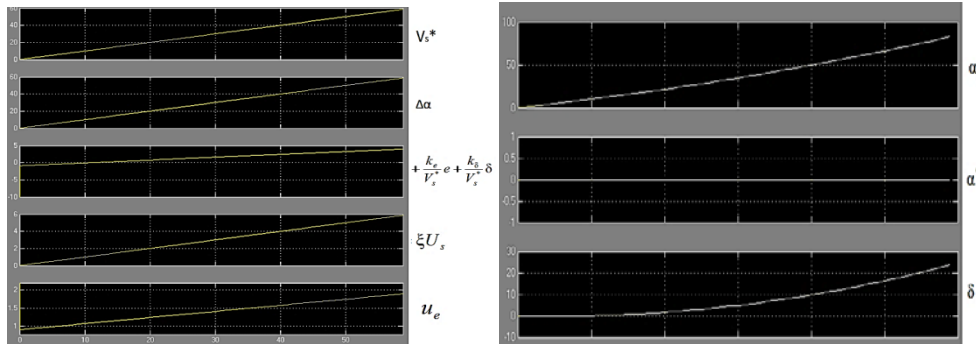


Рис. 4- Зависимость поперечного управления от угловой ориентации

Соответствующая траекторная модель мобильного робота имеет вид (формула (8)): [1]

$$\left. \begin{aligned} \dot{s} &= Ku_s, \\ \dot{e} &= \dot{s}\delta, \\ \dot{\delta} &= -\xi\dot{s} + Ku_e, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где \dot{s} – продольная динамика робота; \dot{e} – поперечная динамика робота; $\dot{\delta}$ – угловая динамика робота.

Дифференциальные уравнения (8) характеризуют переходный процесс перемещения робота. Переходный процесс угла поворота представлен на рисунке 5. Зависимость (5) и (8) показывают, что при малой скорости или при больших коэффициентах обратной связи, длительность переходного процесса уменьшается за счет увеличения управляющих

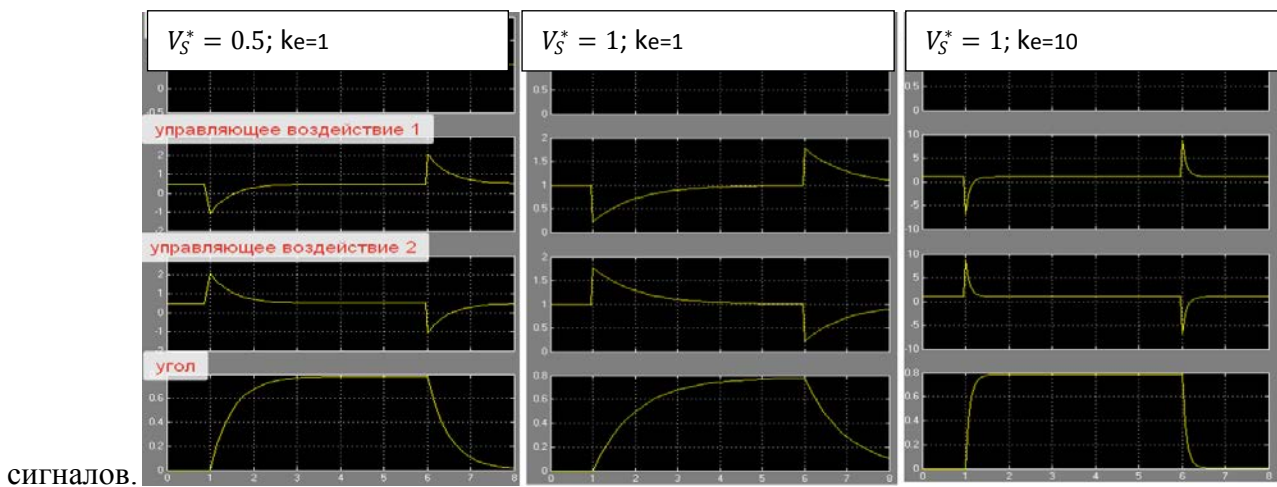


Рис. 5 – Переходный процесс угла поворота при $V_s^* = 0.5; k_e = 1; V_s^* = 1; k_e = 10$

Для поворота робота на определенный угол α , подается сигнал угловой ориентации $\Delta\alpha$. На рисунке 6 показан поворот робота.

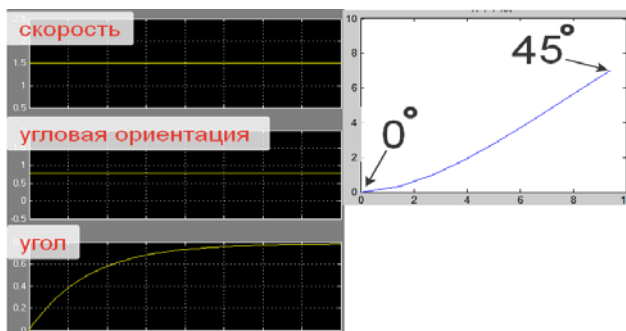


Рис.6 –Поворот робота на угол $\alpha = 0.8$ рад

При поданном сигнале продольной скорости V_s^* по траектории, и при $\Delta\alpha = 0$, робот поедет по прямой как показано на рисунке 7.

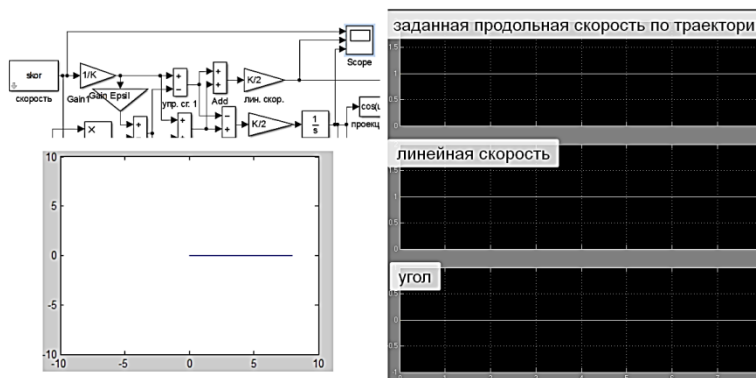


Рис.7 – Движение вдоль оси x_1

Для нахождения управления любой траектории, необходимо найти угол $\Delta\alpha$ и скорость V_s^* в каждый момент времени, для этого следует провести дискретизацию с шагом Δx_1 , как показано на рисунке 8.

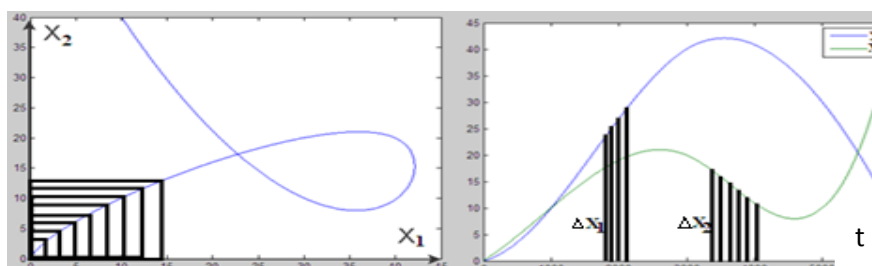


Рис.8 – Деление заданной траектории движения робота

После нахождения скорости V_s^* и угла α , в каждый момент времени, $\Delta\alpha$ и V_s^* подаются на блоки в Simulink, для моделирования траектории.

Обратная связь по углу корректирует только угловое влияние на линейную скорость (рисунок 9).

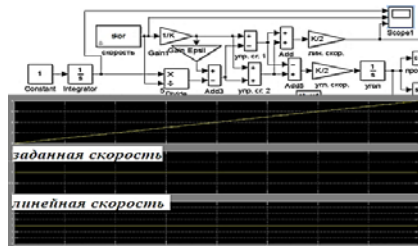


Рис.9 – Влияние обратной связи на линейную скорость

Наблюдаемые (измеренные) координаты робота $y_1(t)$ и $y_2(t)$ (формула (9)):

$$y_1(t) = x_1(t) + \varepsilon_1(t), y_2(t) = x_2(t) + \varepsilon_2(t) \quad (9)$$

где $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ – неконтролируемые возмущения (проскальзывание).

Обратная связь позволяет компенсировать влияние неконтролируемых возмущений при условии контроля текущего положения мобильного робота $y_1(t), y_2(t)$. Для имитации возмущений задаются случайные воздействия, которые изменяют траекторию движения мобильного робота. При помощи блоков функций $Q(x)$ и $Q(y)$, показанными на рисунке 2, находятся отклонения от заданной траектории $\Delta Q(x_1, x_2) = Q(x_1, x_2) - Q(y_1, y_2)$. Эти отклонения поступают на регулятор поперечного движения, которые обеспечивают возврат робота на заданную траекторию (рисунок 10).

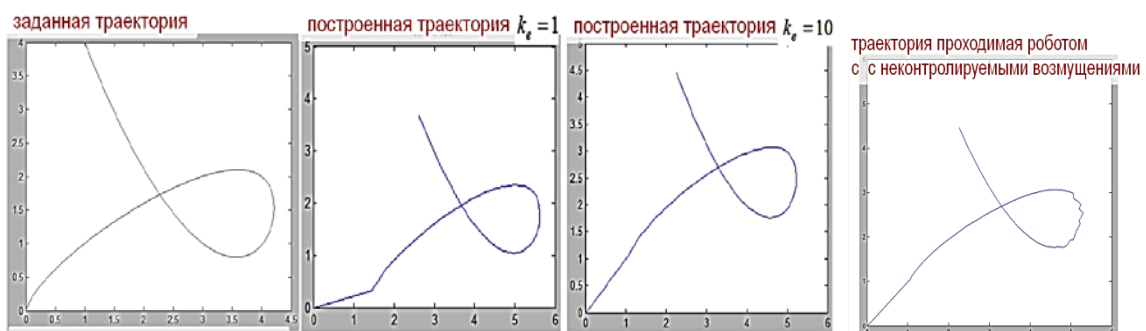


Рис.10 – Прохождение траектории мобильным роботом без внешних возмущений и с внешними возмущениями

Заключение

В результате проведенных исследований разработана модель замкнутой системы управления кинематической модели робота в среде Simulink, выявлено влияние коэффициентов обратной связи на качество управления системой.

Список использованных источников

1. Бурдаков, С.Ф. Системы управления движением колесных роботов / Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. - СПб. : Наука, 2001. - 231 с.,

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА С МНОГОВИТКОВЫМ ИНДУКТОРОМ

Гуляшинов А.А., Винтер Э. Р., Фомин А. В.

Научный руководитель д-р техн. наук Первухин М. В.

Сибирский федеральный университет

Электромагнитные кристаллизаторы – класс конструкций формообразователей, в которых на протяжении всего процесса отливки, слиток физически не контактирует с формообразователем [1]. Отсутствие контакта исключает образование ликвационных наплывов и механических дефектов, а наличие жидкой зоны над кристаллизующейся частью слитка предотвращает возможность образования неслитин. По этим причинам слиток имеет гладкую и блестящую поверхность [2].

Структура слитка, в особенности его периферийной области, характеризуется однородностью химического состава, тонким и равномерным кристаллическим строением, высокими механическими свойствами, особенно пластическими.

На сегодняшний день наиболее детально рассматривается одновитковый вариант исполнения индуктора ЭМК, обладающий определенным технологическим недостатком: из-за особенности конструкции токоподводов распределение электромагнитного поля в системе «индуктор-слиток» неравномерно. Что в свою очередь может вызвать нарушение заданной геометрии слитка.

Для устранения данной проблемы предлагается использование электромагнитного кристаллизатора с многовитковым индуктором. Конструктивная особенность такого исполнения технологического оборудования позволяет добиться наиболее равномерного распределения электромагнитного поля в рабочей области.

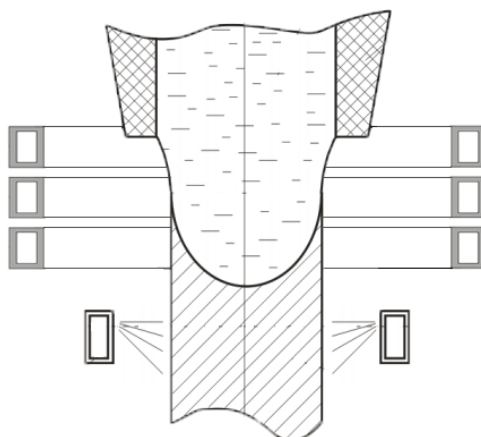


Рис. 1 – Эскиз многовиткового электромагнитного кристаллизатора

Система уравнений, описывающих в общем виде электромагнитные процессы в слитке, формируемом магнитным полем, состоит из уравнения векторного потенциала и уравнения непрерывности (в данном случае можно пренебречь токами смещения, а так же на уравнение векторного потенциала накладывается кулоновская калибровка ($\nabla \mathbf{A} = 0$) и учитывается отсутствие в расчетной области свободных электрических зарядов ($\sigma = 0$ и $\varphi = 0$):

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_a \mathbf{\delta}; \quad (1)$$

$$\nabla \mathbf{\delta} = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{A} – векторный потенциал; $\mathbf{\delta}$ – вектор плотности полного тока; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость; φ – скалярный потенциал неподвижных зарядов; σ – плотность сторонних зарядов.

Вектор плотности тока, входящий в выражения (1) и (2) имеет вид:

$$\mathbf{\delta} = \gamma \left(-\frac{\mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \right), \quad (3)$$

где γ – удельная электрическая проводимость.

В процессе исследования картины распределения напряженности электромагнитного поля в кристаллизующийся слиток была построена математическая модель. В ходе моделирования был принят ряд допущений, позволяющий сократить количество вычислительных процессов в пределах допустимой погрешности[3].

Вычисления математической модели проводятся методом конечных элементов. Для того чтобы избежать излишних вычислений, задача решается в осесимметричной постановке (Рис. 2 а). С этой же целью в областях, удалённых от индуктора строится укрупнённая сетка (Рис. 2 б).

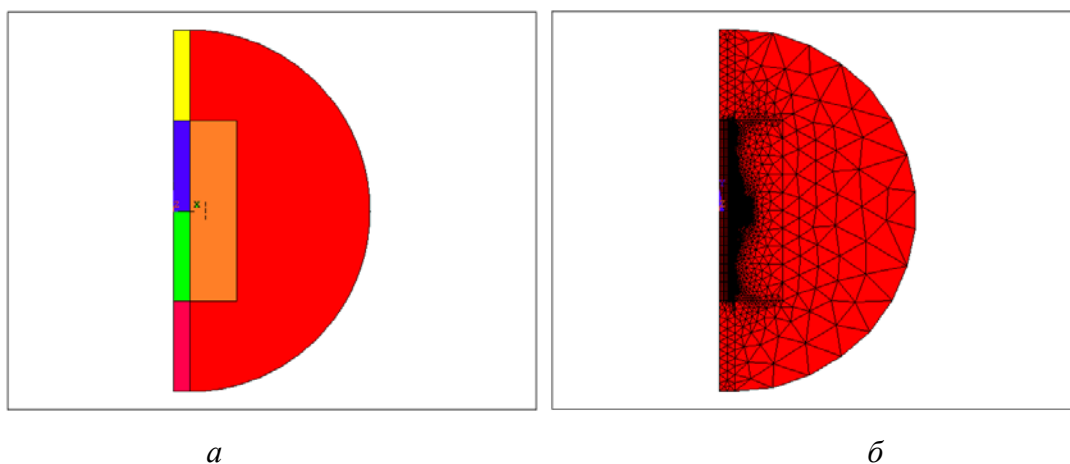


Рис. 2 – Построение математической модели (а) и расчётной сетки (б)

Из-за ярко выраженного поверхностного эффекта при высоких частотах, область индуктора, представленная на рисунке 3 а, б строится соразмерно с глубиной проникновения тока.

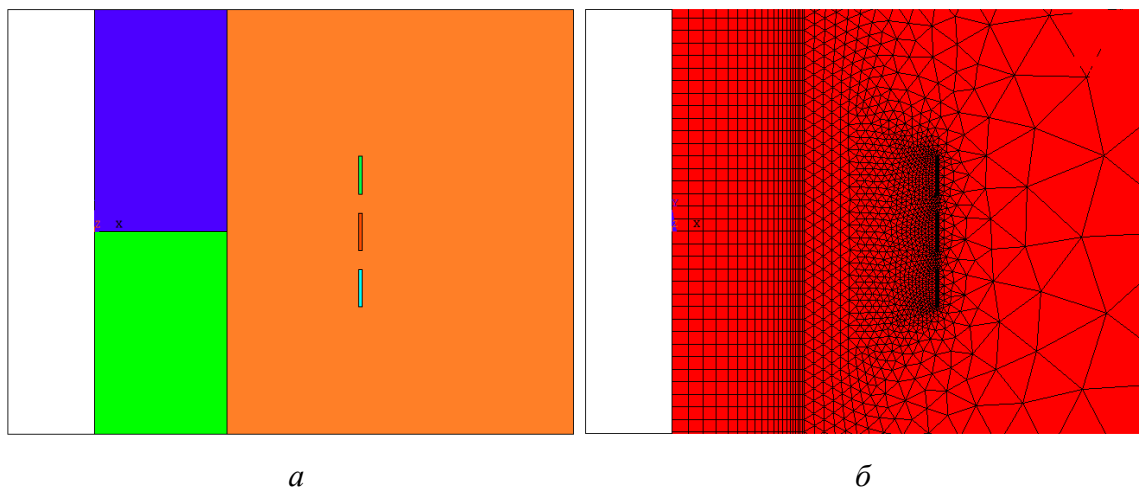


Рис. 3 – Область индуктора в математической модели (а) и в расчётной сетке (б)

По результатам вычислений построена картина распределения напряженности электромагнитного поля и сил Лоренцев слитке (Рисунок 4 а, б). Разность значений в областях, моделирующих жидкую и твердую фазы слитка объясняются отличием электромагнитных свойств алюминия в жидком и твердом состоянии.

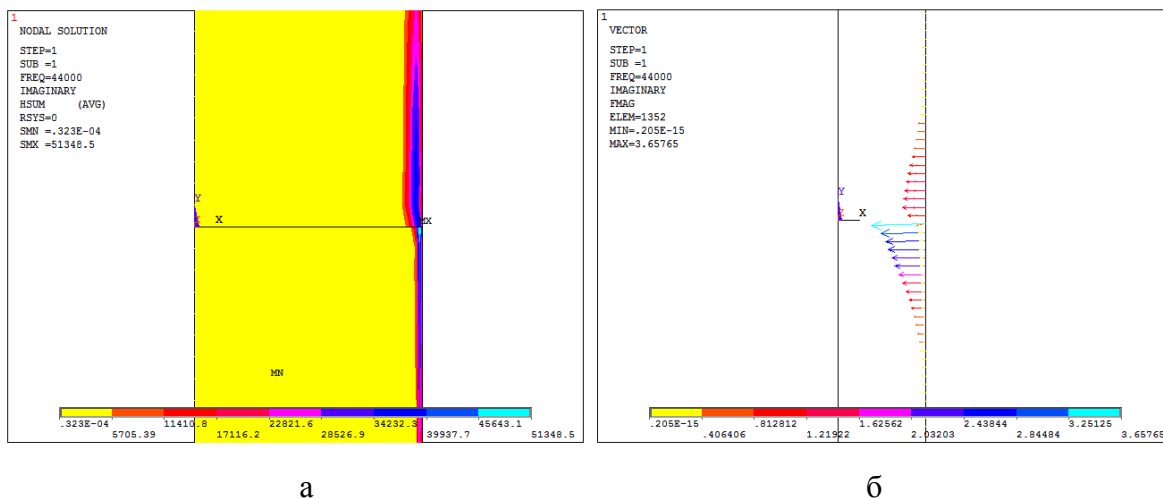


Рис. 4 – Распределение электромагнитного поля (а) и сил Лоренца (б) в слитке

Графики, представленные на рисунке 5 а, б соответствуют приведенному выше распределению электромагнитного поля по высоте и сил Лоренца по глубине слитка и демонстрируют, что максимальное значение воздействия на слиток находится именно в зоне кристаллизации.

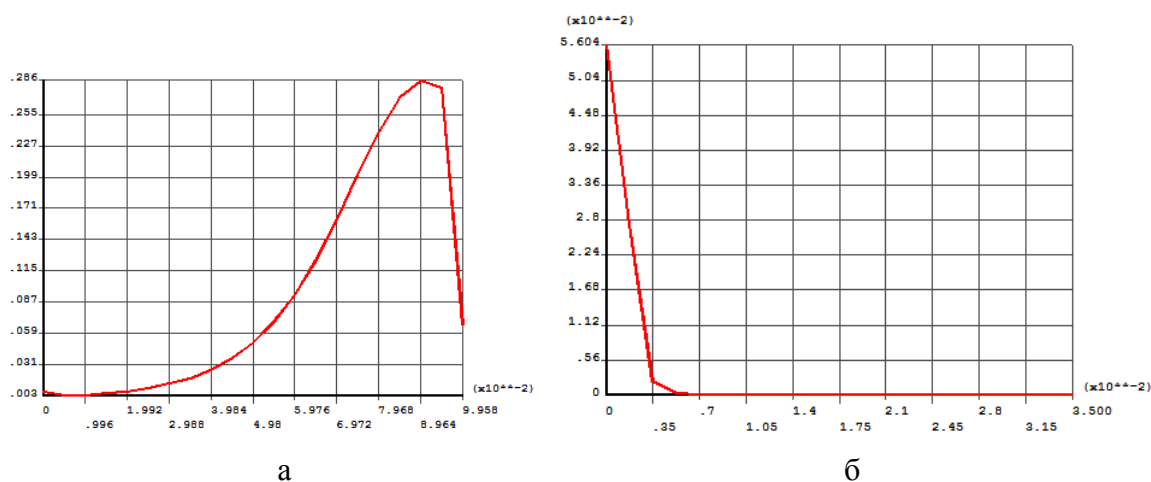


Рис. 5 – Графики распределения ЭМ поля (а) и сил Лоренца (б) в слитке

Из указанного выше можно сделать вывод, что построенная модель, предназначенная для расчёта распространения электромагнитного поля в кристаллизующемся слитке физична и соответствует действительности, так как данные, полученные расчётным путём соответствуют полученным экспериментально.

Список использованных источников

1. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV. Бааке Э., Барглик Д., Лупи С. [и др.]. СПб.: Изд - во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 250 с. [MHD technologies in metallurgy. Intensive course Specific IV. Baake E., Barglik J., Jakovics A., Khatsayuk M., Lupi S., Nikanorov A., Pavlov E., Pavlovs S., Pervukhin M., Timofeyev S., Timofeyev V. St. Petersburg: Publishing house of ETU, 2013. 250 p.]
2. Непрерывное литьё в электромагнитный кристаллизатор. Гецелев З. Н., Балахонцев Г. А., Квасов Ф. И., Черепок Г. В., Варга И. И., Мартынов Г. И. М.: Металлургия, 1983. 152 с. [Continuous casting in an electromagnetic crystallizer. Getsel'ev Z. N., Balakhontsev G. A., Kvasov F. I., Cherepok G. V., Varga I. I., Martynov G. I., Moscow: Metallurgiya, 1983. 152 p.]
3. AnsysHelp 17.0 [Электронный ресурс]. Академическая лицензия ANSYS 17.0. ФГАОУ ВО СФУ

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МУЛЬТИМАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ

Богданов А. В.

Научный руководитель канд. техн. наук, проф. Тремясов В. А.

Сибирский федеральный университет

В России имеется множество автономных электропотребителей, не имеющих по ряду причин связи с Единой энергосистемой. Для питания таких потребителей в настоящее время используются дизельные электростанции (ДЭС). Однако, из-за высокой стоимости дизельного топлива, возможных проблем с его доставкой, хранением и негативным влиянием продуктов работы дизельных двигателей на окружающую среду целесообразным является использование других источников энергии совместно с дизель-генераторами (ДГ). Одним из таких источников является солнечная энергия [1,2]. Для объединения с ДГ в настоящее время используются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП).

Одним из важнейших показателей таких установок является надежность. Для оценки надежности необходимо определить ее количественные показатели. В настоящее время для решения этой задачи в энергетике разработаны и применяются различные методы [3]. Важной особенностью солнечно-дизельной установки (СДУ) является зависимость выработки энергии от интенсивности солнечной радиации. Однако, методы оценки надежности СДУ, применяемые в настоящее время, не учитывают этого фактора.

Для расчета надежности с учетом указанного фактора предлагается мультиматричный метод. Исходными данными для расчета служат актинометрические данные для определенного месторасположения СДУ, интенсивность отказов λ_i и среднее время восстановления τ_i элементов СДУ (таблица 1). Для уменьшения трудоемкости расчетов близкие по величине среднемесячные суточные значения солнечной радиации объединяются и определяется их среднее значение. В результате получают мульти-модель солнечной радиации с несколькими состояниями $T_1, T_2, T_3, \dots, T_p$ ($p=1,2,3 \dots l$) в течение года.

Для каждого мульти-состояния T_p определяется недовыработка электроэнергии. Всем элементам СДУ даются номера i , где $i=1,2,\dots,n$. Определяются все возможные режимы работы установки: режиму нормальной работы соответствует номер $j=0$, аварийным режимам присваиваются номера $j=1,2,\dots,m$. Тогда относительная длительность ремонтных режимов определяется по формуле

$$q_j = \lambda_{ij} \tau_{ij}, \quad (1)$$

а относительная длительность нормального режима равна

$$q_0 = \left(1 - \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \tau_{ij} \right) \quad (2)$$

Далее для каждого состояния T_p составляется матрица логических связей отказов, режимов и аварий. Под аварией понимается событие, которое приводит к снижению вырабатываемой мощности, все аварии получают свой код $k = 1, 2, 3, \dots, n$.

Снижение мощности, вызванное потерей ДГ, равно его номинальной мощности. Среднее снижение мощности, к которому приводит отказ ФЭП, оценивается для каждого состояния T_p , кВт

$$\Delta N_{\text{ФЭП}}^{(T)} = \frac{E^{(T)}}{t_{\text{ФЭП}}^T} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot S_{\text{ФЭП}} \cdot n_{\text{ФЭП}}, \quad (3)$$

где $E^{(T)}$ – усредненное для каждого состояния T_p суточное удельное значение падающей солнечной радиации, кВт·ч/м²; η_1 – КПД ФЭП, о.е.; η_2 – КПД инвертора, о.е.; η_3 – КПД конвертора, о.е.; $S_{\text{ФЭП}}$ – площадь одного фотоэлектрического преобразователя, м²; $n_{\text{ФЭП}}$ – количество ФЭП в составе СДУ, шт; $t_{\text{ФЭП}}^T$ – среднее число часов работы ФЭП в сутки для каждого состояния T_p , зависящее от долготы дня.

Среднее снижение мощности, кВт, вызванное отказом АБ определяется по выражению

$$\Delta N_{\text{АБ}}^{(T)} = \frac{W_{\text{АБ}}}{t_{\text{АБ}}^T}, \quad (4)$$

где $W_{\text{АБ}}$ – энергия, запасенная АБ, кВт·ч; $t_{\text{АБ}}^T$ – время непрерывного разряда батареи в течении суток для каждого состояния T_p , ч.

Частота аварий k -го вида, 1/год, находится по формуле

$$\Lambda(k) = \frac{T_p}{8760} \cdot \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_i \lambda_{ji} L(j, i, k), \quad (5)$$

где $L(j, i, k) = 1$, если в матрице расчетных связей на пересечении i -й строки и j -го столбца находится авария вида k .

Среднее время восстановления нормального режима работы СДУ после аварии k -го вида, год, определяется как

$$\tau(k) = \frac{1}{\Lambda(k)} \left(\sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_i \lambda_{ji} \tau(j, i, k) L(j, i, k) \right), \quad (6)$$

где $\tau(j, i, k)$ – время восстановления нормального функционирования установки после аварии k -го вида в j -ом режиме при отказе i -го элемента.

Среднее значение аварийного недоотпуска энергии установкой в результате аварии k -го вида в течение длительности состояния T_p , кВт·ч,

$$\Delta W_{СДУk}^{(T)} = \frac{t_k^T}{24} \cdot T_p \cdot \Lambda(k) \tau(k) \Delta N(k), \quad (7)$$

где t_k^T – продолжительность работы элементов, отказ которых приводит к k -той аварии, в течении суток, ч.

Далее определяется недовыработка электроэнергии за время всех состояний T_p .

В качестве примера произведем расчет надежности СДУ расположенной в поселке Яйлю Республики Алтай (рис.1). Автономная СДУ включает в себя 496 ФЭП с пиковой мощностью 115 Вт, способные выдавать до 60 кВт; 2 ДГ номинальной мощностью по 40 кВт каждый, а также банк АБ с запасенной энергией 144 кВт·ч.

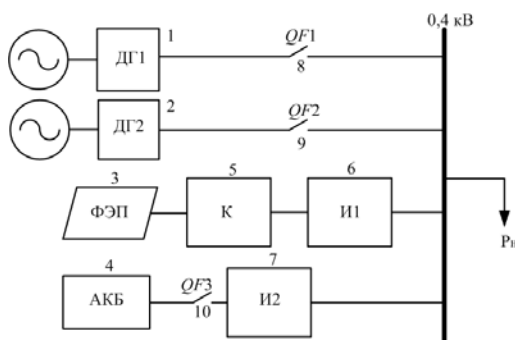


Рис. 1 – Структурная схема автономной СДУ в п. Яйлю:

ДГ – дизельный генератор; ФЭП – фотоэлектрический преобразователь; АКБ – банк аккумуляторных батарей; И – инвертор; К – конвертор; QF – автоматический выключатель; P_n – нагрузка.

Таблица 1 – Показатели надежности элементов СДУ

Элемент СДУ		Номер элемента в схеме	Интенсивность отказов λ , 1/год	Среднее время восстановления τ , год
ФЭП		3	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$6,67 \cdot 10^{-2}$
Дизельный генератор	рабочий	1	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$
	резервный	2	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$
АБ		4	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$
Инвертор		6,7	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Конвертор		5	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Выключатель		8, 9, 10	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$4,57 \cdot 10^{-4}$

Объединяя месяца с близким средним значением суточной радиации (рис. 2) получим мульти-модель солнечной радиации с 5 состояниями (таблица 2).

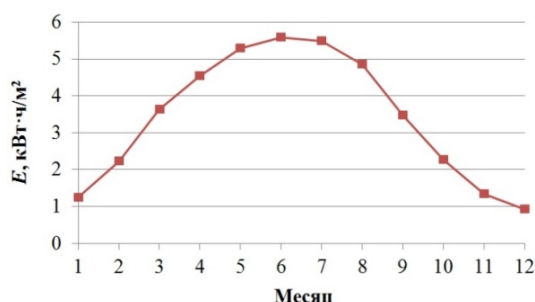


Рис. 2 – Среднесуточное значение падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность для каждого месяца года в п. Яйлю Республики Алтай

Таблица 2 – Мульти-модель значений солнечной радиации

Месяц	E , кВт·ч/м ²	$E_{\text{ср}}$, кВт·ч/м ²	T_p	Длительность периода T_p , дней (часов)
Январь	1,25	1,17	T_5	92 (2208 ч)
Ноябрь	1,34			
Декабрь	0,92			
Февраль	2,22	2,25	T_4	59 (1416 ч)
Октябрь	2,27			
Март	3,63	3,55	T_3	61 (1464 ч)
Сентябрь	3,48			
Апрель	4,53	4,69	T_2	61 (1464 ч)
Август	4,86			
Май	5,28	5,45	T_1	92 (2208 ч)
Июнь	5,58			
Июль	5,49			

Задаются возможные режимы установки j для каждого мульти-состояния: $j=0$ – нормальный режим работы СДУ; $j=1$ – аварийный ремонт ДГ1 или QF1; $j=2$ – аварийный ремонт аварийный ремонт ДГ2 или QF2; $j=3$ – аварийный ремонт ФЭП или К или И1; $j=4$ – аварийный ремонт АБ или QF3 или И2.

Матрица расчетных связей для мульти-состояния T_1 представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица расчетных логических связей для мульти-состояния T_1

i	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4
1	1 (40,00 кВт)	–	2(80,00 кВт)	3 (64,26 кВт)	4 (60,00 кВт)
2	1 (40,00 кВт)	2 (80,00 кВт)	–	3 (64,26 кВт)	4 (60,00 кВт)
3	5 (24,26 кВт)	3 (64,26 кВт)	3 (64,26 кВт)	–	–
4	7 (20,00 кВт)	4 (60,00 кВт)	4 (60,00 кВт)	6 (44,26 кВт)	6 (44,26 кВт)
5	5 (24,26 кВт)	3 (64,26 кВт)	3 (64,26 кВт)	–	6 (44,26 кВт)
6	5 (24,26 кВт)	3 (64,26 кВт)	3 (64,26 кВт)	–	6 (44,26 кВт)
7	7 (20,00 кВт)	4 (60,00 кВт)	4 (60,00 кВт)	6 (44,26 кВт)	–
8	1 (40,00 кВт)	–	2 (80,00 кВт)	3 (64,26 кВт)	4 (60,00 кВт)
9	1 (40,00 кВт)	2 (80,00 кВт)	–	3 (64,26 кВт)	4 (60,00 кВт)
10	7 (20,00 кВт)	4 (60,00 кВт)	4 (60,00 кВт)	6 (44,26 кВт)	–

Расчетные аварии (k): 1 – потеря одного ДГ; 2 – потеря одного ДГ при ремонте другого; 3 – потеря ДГ и ФЭП; 4 – потеря ДГ и АБ; 5 – потеря ФЭП; 6 – потеря ФЭП и АБ, 7 – потеря АБ.

Результаты расчета показателей надежности приведены в таблице 4. Общая недовыработка электроэнергии СДУ за год составила 1920,70 кВт·ч/год.

Таблица 4 – Результаты расчета для состояния T_1

Описание аварии k	$\Lambda(k)$, 1/год	$\tau(k)$, год	$\Delta N_p(k)$, кВт	$\Delta W_p(k)$, кВт·ч
1	0,03034	0,1698	40,00	227,41
2	$7,985 \cdot 10^{-5}$	0,1704	80,00	2,40
3	$2,089 \cdot 10^{-4}$	0,0770	52,13	1,85
4	$3,347 \cdot 10^{-4}$	0,1797	60,00	7,97
5	0,03093	0,0498	12,13	40,72
6	$2,414 \cdot 10^{-4}$	0,0735	32,13	1,26
7	0,02537	0,1946	20,00	217,91

Обоснована целесообразность дифференциации величин солнечной радиации в течение года на несколько периодов, для каждого из которых проводятся расчеты ожидаемой недовыработки электроэнергии. Предложен мультиматричный метод, позволяющий производить анализ надежности СДУ с учетом изменения интенсивности солнечного излучения в течение года и соответствующих изменений режима работы СДУ.

Результаты расчетов на примере СДУ в п. Яйлю Республики Алтай показали высокий уровень надежности фотоэлектрической части СДУ, наибольшая часть потерь энергии приходится на ДГ.

Список использованных источников

1. *Assessment of parabolic trough and power tower solar technology cost and performance forecasts*. Sargent & Lundy LLC Consulting Group, Chicago, Illinois, 2003.
2. Chen W., Yuefeng L. *Solar photovoltaic* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/111501/SOLAR%20PHOTOVOLTAIC1.pdf?sequence=1>.
3. Гук Ю. Б. *Анализ надежности электроэнергетических установок*. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1988, 224 с. [Guk Y. B. *Analysis of reliability of power installations*. L.: Energoatomizdat. Leningr. department, 1988, 224 p. (in Russian)].