

Соловьев В. А., Малюкова А. И.
V. A. Solovyev, A. I. Malyukova

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE CUTTING PROCESS OF A CHIPPER

Соловьёв Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Vyacheslav A. Solovyov – Doctor of Engineering, Professor, Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Малюкова Александра Игоревна – программист факультета энергетики и управления Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: feu_malyukovaai@mail.ru.

Alexandra I. Malyukova – IT-specialist, Faculty of Electrical Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: feu_malyukovaai@mail.ru.

Аннотация. В работе рассмотрена методика расчёта усилий резания древесины, учитывающая ряд характеристик древесины и режущего инструмента. Представлена модель процесса резания дисковой рубительной машины. Приведены результаты моделирования и экспериментальные осциллограммы, подтверждающие адекватность полученных результатов.

Summary. The design procedure of wood cutting force considering a line of wood and cutting tool factors is described in the paper. A model of disc chipper cutting process is presented. The results of modelling and experimental diagrams confirming adequacy of received results are given.

Ключевые слова: модель, усилие резания, дисковая рубительная машина.

Key words: model, cutting force, disc chipper.

УДК 674.05:681.5

Рубительные машины работают в наиболее неблагоприятных условиях по сравнению с другим деревообрабатывающим оборудованием. Они измельчают низкокачественную древесину и древесные отходы с корой, гнилью, минеральными примесями, причём древесина бывает и низкой влажности (сухая), и мороженая. Режущие инструменты испытывают высокие нагрузки. Влажность древесины может колебаться в широких пределах. Наличие влаги существенно влияет на механические показатели древесины. С увеличением влажности модули упругости и прочности снижаются, удельная работа и мощность рубки уменьшаются. В зимних условиях свободная вода замерзает, что сильно увеличивает расход энергии на рубку и ухудшает качество щепы [1].

Основной задачей системы регулирования электропривода рубительной машины является поддержание постоянства скорости вращения. Это обусловлено как энергетическими, так и технологическими показателями. В процессе рубки баланса величины сил и моментов резания не являются постоянными, а меняются в зависимости от характеристик древесины, ширины резания, угловых параметров патрона и углов поворота ножевого диска. При нерегулируемом электроприводе наблюдаются перепады скорости и, соответственно, высокие динамические моменты [11].

Динамические характеристики оказывают влияние на качество обработки, поэтому система регулирования должна обеспечивать оптимальные динамические характеристики по управляющему и возмущающему воздействиям.

Для оптимизации технологического процесса на рубительной машине необходимо исследовать процессы резания. Изучения на промышленных рубительных машинах весьма затруднительны ввиду необходимости использования особых инструментов, а также внесения изменений в процесс резания. Кроме того, в данных устройствах отсутствует возможность динамического изменения конфигурации геометрических характеристик баланса, а также управления ходом резания. Поэтому для исследования процессов резания предлагается создать математическую модель, позволяющую на основании знания необходимых параметров ножа, древесины и окружающей среды получать на выходе график усилия резания, адекватный графику, снятому с реальной машины.

Принцип построения математической модели процесса резания приведём на примере наиболее распространённой дисковой рубительной машины.

В дисковых рубительных машинах баланс диаметром d подают под вращающийся ножевой диск по наклонному питающему патрону, имеющему, как известно, в общем случае два угла наклона α_1 и α_2 [4]. Каждый режущий нож диска срезает шайбу эллиптической формы с осями $2a$ и $2b$.

Определим момент силы резания аналитическим путём. Расчётная схема приведена на рис. 1. На лезвии режущего ножа выбираем отрезок элементарной длины dl , на который действует элементарная сила резания $dp = pdl$.

Элементарный момент резания относительно оси вращения диска запишется как

$$dM = ldp = pldl.$$

Суммарный момент резания (сил полезного сопротивления) будет равен

$$M = \int_{l_1}^{l_2} pldl = \frac{1}{2}p(l_2^2 - l_1^2),$$

где $l_1^2 = r_1^2 - k^2$, $l_2^2 = r_2^2 - k^2$.

Применим две системы координат $\bar{x}\bar{y}$ и xOy . Вторая система расположена от первой на расстоянии m и n и повернута на угол α_2 , соответствующий углу разворота.

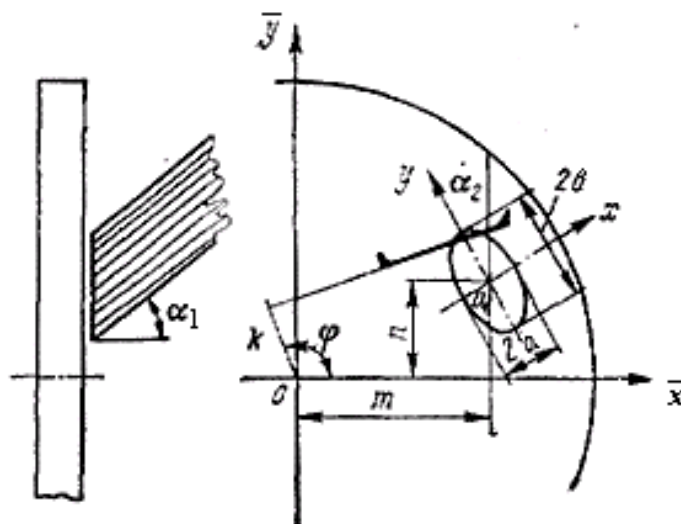


Рис. 1. Расположение режущих ножей и древесины в плоскости диска

После преобразования координат, решая совместно уравнения лезвия режущего ножа и эллипса резания, получим выражение суммарного момента резания. Для частного случая, когда питающий патрон имеет один угол наклона к горизонту α_1 ($\alpha_2 = 0$) и горизонтальная ось эллипса совпадает с горизонтальной осью диска, т. е. $n = 0$,

$$M = \frac{pab\sqrt{C^2 - A^2}}{C^2} ((mC^2 + Aa^2 \cos \varphi) \sin \varphi + Ab^2 \sin \varphi \cos \varphi),$$

где $C^2 = b^2 \sin^2 \varphi + a^2 \cos^2 \varphi$, $A = k - m \cos \varphi$.

Для того чтобы учесть конкретные производственные условия работы рубительной машины, при расчёте удельной силы p дополнительно вводятся коэффициенты: a_p – коэффициент затупления режущих ножей, a_w – коэффициент, учитывающий влажность древесины, a_t – коэффициент, учитывающий агрегатное состояние свободной влаги в древесине (мороженная древесина), и a_n – коэффициент, учитывающий породу древесины [8]. Таким образом, удельная сила резания для конкретных условий будет равна

$$p = P_{уд}(\varphi_в, \varphi_н) a_p a_w a_t a_n,$$

где $\varphi_в$ – угол встречи вектора скорости резания с направлением волокон древесины, $\varphi_в = 90 - \alpha_1$; $\varphi_н$ – угол наклона (угол, лежащий между линией лезвия ножа и направлением волокон древесины), $\varphi_н = 90 - \alpha_2$; $P_{уд}(\varphi_в, \varphi_н)$ – удельная касательная сила резания, Н/мм, $P_{уд}(\varphi_в, \varphi_н) = h \sin^2(\varphi_в) \sin^2(\varphi_н) - \cos^2(\varphi_н) + 2$, здесь h – толщина срезаемого слоя, мм [7].

График усилия резания при установившемся резе представляет собой периодическую кривую (см. рис. 2). Форма кривой зависит от целого ряда факторов: типа древесины, её возраста, влажности древесины, температуры среды, угла атаки режущего ножа, формы режущего ножа и т.п.

Как известно, любую периодическую кривую можно представить в виде гармонического ряда, например ряда Фурье. Как показал анализ, для практического отображения реальной кривой усилия резания достаточно использовать три члена ряда Фурье ($n = 3$) [9].

Кроме того, анализ кривых подтверждает предположение, что при изменении характеристик древесины, параметров ножа (тип древесины, возраст древесины, влажность, угол атаки режущего ножа и т.п.) изменению подвергаются амплитуда кривой, величина постоянной составляющей периодической кривой, величина периода колебаний, что хорошо согласуется с формулой ряда Фурье.

При исследовании модели (см. рис. 3) изменениям подвергались три параметра – a_p , a_w , a_t . Коэффициент a_n принимался равным 1,07 (порода древесины – лиственница).

Как видно из рис. 2 и 4, кривая усилия резания, полученная на основании представления его в виде ряда Фурье, адекватна экспериментальной кривой на участке установившегося реза.

Предложенная математическая модель процесса резания позволит исследовать процесс резания с учётом влияния на процесс таких факторов, как порода, температура и влажность древесины, состояние ножей. Учёт этих параметров позволит создать систему управления, которая будет компенсировать их влияние.

При построении графиков полезной нагрузки за один цикл примем время прохождения ножом диска одного эллипса резания. На рис. 5 показано изменение момента нагрузки за один цикл резания.

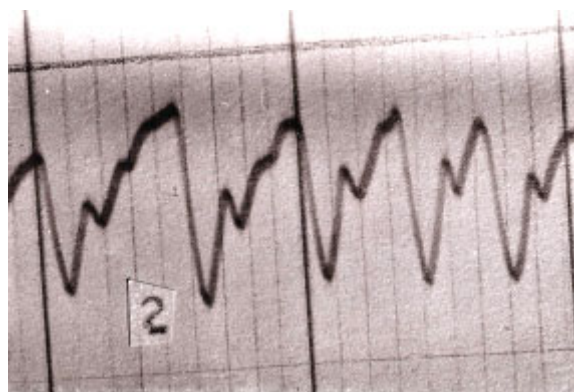


Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма изменения силы резания

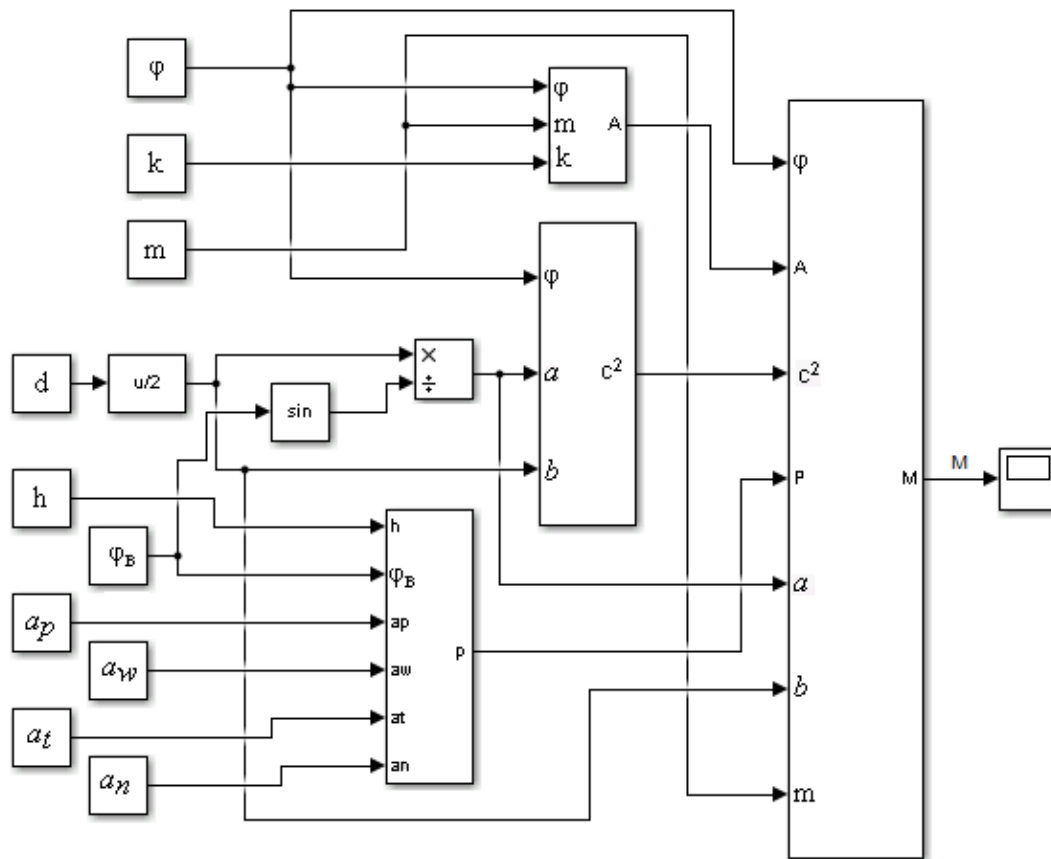


Рис. 3. Схема модели в среде MatLab

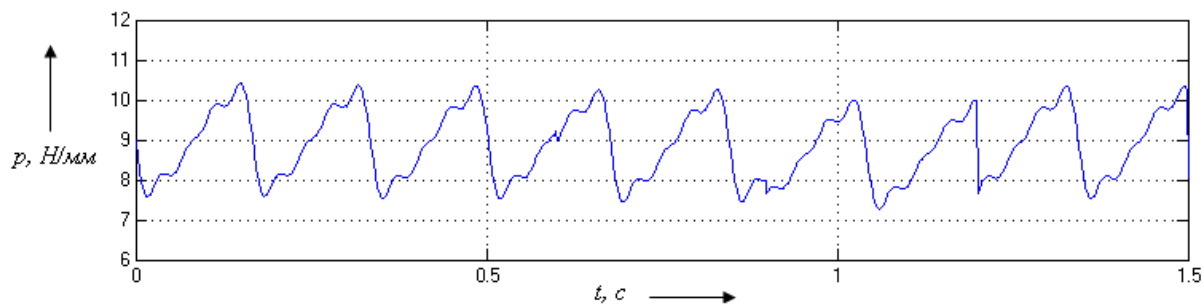


Рис. 4. Изменение силы резания, полученное по результатам моделирования

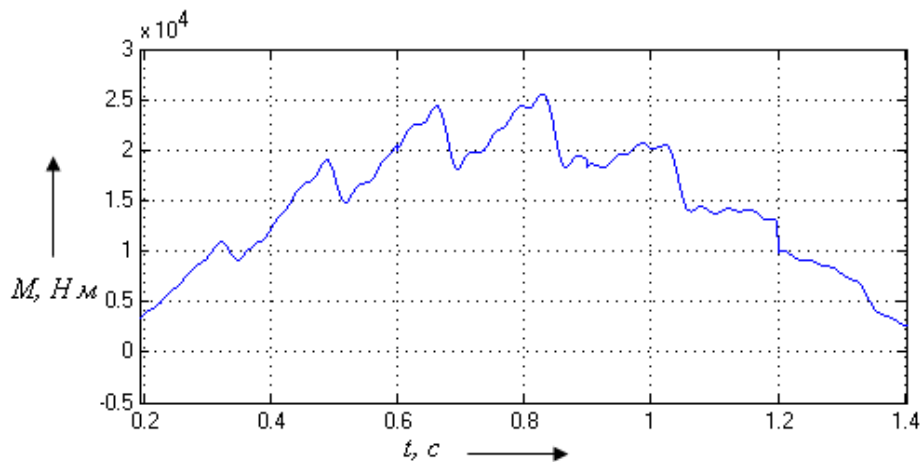


Рис. 5. Изменение момента нагрузки за один цикл резания, полученное по результатам моделирования

Нагрузка является резкопеременной. При нерегулируемом электроприводе наблюдаются перепады скорости и, соответственно, высокие динамические моменты. Так как динамические характеристики оказывают влияние на качество обработки, переходный процесс при изменении нагрузки должен иметь минимальное время. Для решения этой задачи предлагается использовать регулируемый электропривод, который позволит компенсировать изменения параметров объекта регулирования. Поскольку изменение параметров может происходить в процессе резания, а построение регулятора потребует учёта большого количества характеристик, целесообразно использовать аппарат мягких вычислений, в частности синтезировать систему управления на основе нечёткой логики. Согласно исследованиям, нечёткий регулятор способен компенсировать возникающие в объекте управления изменения параметров, что позволяет оптимизировать переходные процессы. Нечёткий регулятор обеспечивает уменьшение чувствительности системы к изменению параметров объекта управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, А. Е. Подготовка ножей рубительных машин для переработки усыхающих древостоев / А. Е. Алексеев, А. И. Думанский, А. П. Алабышев // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2012. – № 34. – С. 24-26.
2. Болдырев, В. С. Технология лесопильно-деревообрабатывающих производств / В. С. Болдырев. – Воронеж: ВГЛТА, 2016. – 316 с.
3. Бузикаева, А. В. Анализ многокаскадных нечётких регуляторов Сугено и Мамдани во внешнем каскаде для систем управления электроприводами переменного тока / А. В. Бузикаева, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 76-84.
4. Вальщиков, Н. М. Рубительные машины / Н. М. Вальщиков. – Л.: Машиностроение, 1970. – 328 с.
5. Васильев, С. Б. Производство щепы на предприятиях лесного комплекса : учеб. пособие / С. Б. Васильев, В. И. Пяткин, И. Р. Шегельман. – СПб.: СПбЛТА, 2002. – 68 с.
6. Технологические решения для реализации потенциала ресурсосбережения при переработке круглых лесоматериалов на щепу / С. Б. Васильев, Л. А. Девятникова, Г. Н. Колесников, И. В. Симонова. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2013. – 92 с.
7. Васильев, С. Б. Техника и технология производства щепы в леспромпхозе / С. Б. Васильев, В. И. Пяткин, И. Р. Шегельман. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2001. – 100 с.
8. Гончаров, В. Н. Основы теории и расчёта оборудования для подготовки бумажной массы. Часть 2. Рубительные машины: учеб. пособие / В. Н. Гончаров, А. А. Гаузе, М. В. Аввакумов. – СПб.: СПбГТУРП, 2012. – 50 с.
9. Косицин, В. Г. Математическое описание процесса среза толстой стружки древесины в дисковой рубительной машине / В. Г. Косицин, Ю. В. Рубцов, В. А. Соловьев // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2006. – № 16. – С. 69-75.
10. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: Бином, Лаборатория знаний, 2009. – 800 с.
11. Рубцов, Ю. В. Способ оптимизации получения древесной щепы на дисковых рубительных машинах / Ю. В. Рубцов, С. В. Рудько // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2011. – № 29. – С. 21-24.
12. Рушнов, Н. П. Рубительные машины / Н. П. Рушнов, Э. П. Лицман, Е. А. Пряхин. – М.: Лесная промышленность, 1985. – 208 с.
13. Соловьев, В. А. Нечёткие алгоритмы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с переменной нагрузкой / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 51-58.
14. Фокин, С. В. Совершенствование технических средств переработки отходов лесосечных работ на топливную щепу в условиях вырубki: моногр. / С. В. Фокин. – М.: Инфра-М, 2018. – 187 с.