

Volodymyr Bulgakov, Ivan Holovach* Janusz Nowak**

ТЕОРИЯ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ВЫКАПЫВАНИЯ КОРНЕПЛОДОВ

Аннотация. Построена расчетная математическая модель процесса вибрационного выкапывания корнеплодов сахарной свеклы. При этом корнеплод сахарной свеклы моделируется как твердое тело, а вибрационный выкапывающий орган совершает колебания в продольно-вертикальной плоскости.

Ключевые слова: корнеплод, вибрационный рабочий орган, математическая модель, силовая схема, дифференциальные уравнения

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование вибрационных выкапывающих рабочих органов в свеклоуборочных машинах современного технического уровня обусловлено значительно меньшим их тяговым сопротивлением, способностью извлекать корнеплоды из почвы фактически без повреждений и потерь. Колебания выкапывающего рабочего органа создают условия, при которых с корнеплодов при их выкапывании интенсивно оббивается налипшая почва, что способствует высокому уровню качественных показателей. Поэтому разработка новых конструкций вибрационных выкапывающих рабочих органов, а также исследования их работы с целью определения оптимальных конструктивных и кинематических параметров является актуальной задачей отрасли механизации свекловодства.

Постановка проблемы. Аналитическое исследование процесса взаимодействия рабочих элементов вибрационного выкапывающего рабочего органа с корнеплодом, которое позволит получить кинематические, конструктивные и технологические параметры и даст возможность определить оптимальное их значение.

Анализ результатов исследований по данной проблеме. Фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования вибрационного выкапывания

* Volodymyr Bulgakov, Prof. Sc. D., Ivan Holovach Sc. D., National Agrarian University of Ukraine, Kyiv

**Janusz Nowak Prof. Sc. D., The Agricultural University of Lublin, Poland

корнеплодов сахарной свеклы были опубликованы в работе [Василенко и др. 1970], в которой корнеплод моделируется как тело, имеющее упругие свойства, причем его представлено стержнем переменной поперечного сечения с одним закрепленным концом. Рассмотренные в данной работе поперечные колебания корнеплода описываются с помощью дифференциального уравнения в частных производных четвертого порядка. Непосредственный технологический процесс извлечения корнеплода из почвы при вибрационном приложении усилий тут фактически не рассматривается, а указывается, что с помощью дополнительно составленных уравнений кинестатики найдены условия его извлечения из почвы под действием возмущающей силы, приложенной в поперечно-вертикальной плоскости. В указанной работе считается, что именно такое направление колебаний будет наиболее полно способствовать высококачественному выкапыванию корнеплодов сахарной свеклы из почвы.

В работе [Булгаков и Головач 2002] представлена теория выкапывающего рабочего органа обычного лемешного типа, где найдены условия извлечения корнеплода из почвы при поступательном движении копателя с учетом условий неповреждения корнеплодов. В указанной работе получено выражение для определения допустимой скорости поступательного движения выкапывающего рабочего органа при заданных его конструктивных параметрах. В данном случае процесс извлечения корнеплода из почвы осуществляется под действием сил, возникающих на рабочих поверхностях лемехов в результате поступательного движения выкапывающего рабочего органа вдоль рядков корнеплодов.

Разработанная теория собственных и вынужденных колебаний тела корнеплода [Булгаков и др. 2003] необходима для оценки влияния указанных колебаний на процесс разрушения связей корнеплода с почвой.

Но данных разработок недостаточно для полного анализа непосредственного извлечения корнеплода из почвы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Построить расчетную математическую модель и аналитически рассмотреть динамическую систему корнеплод – рабочий орган для исследования процесса колебаний корнеплода при его вибрационном извлечении из почвы.

КОНЦЕПЦИЯ И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Рассмотрим процесс выкапывания корнеплодов вибрационным копателем, который осуществляется под действием вертикальной гармонической возмущающей силы, передаваемой лемехам от механизма привода. Принцип работы обычного лемешного выкапывающего рабочего органа состоит в том, что при движении по рядку корнеплодов свеклы его клинья разрушают пласт почвы, который вместе с корнеплодом проходит через суживающееся русло копателя, образованное внутренними поверхностями клиньев. Поскольку клинья установлены под соответствующими углами α , β и γ , то взаимодействие пласта почвы вместе с корнеплодом с боковыми поверхностями клиньев при их

поступательном движении происходит таким образом, что пласт почвы сжимается с обеих сторон, деформируется, и для корнеплодов свеклы создаются, при дальнейшем их движении между рабочими поверхностями клиньев, т.е. через суживающееся русло, соответствующие усилия извлечения из почвы.

Следует отметить, что в процессе извлечения корнеплодов свеклы из почвы обычным лемешным выкапывающим рабочим органом важную роль играют силы подпора почвы, благодаря которым пласт почвы сжимается в суживающемся русле копателя, что вызывает появление необходимых для корнеплода сил вертикального извлечения из почвы. Таким образом, наличие сил подпора почвы является необходимым условием работы обычного лемешного выкапывающего рабочего органа.

При выкапывании корнеплодов вибрационным копателем, вследствие колебательного движения лемехов, почва в зоне рабочего русла копателя сильно разрыхляется, а поэтому упомянутые выше силы извлечения корнеплода не возникают, поскольку не происходит необходимой деформации сжатия почвы в русле копателя. Как указано в [Погорелый и др. 1983], наличие почвы в рабочем русле вибрационного копателя не является основным условием для создания усилий извлечения корнеплода из почвы. В этом состоит существенное отличие вибрационного копателя от известных типов выкапывающих рабочих органов. В работе [Погорелый и др. 1983] также отмечено, что если в русле обычного дискового или лемешного выкапывающего рабочего органа корнеплод при наличии сил подпора почвы наклоняется в направлении движения, то в русле вибрационного копателя ось корнеплода при его извлечении из почвы все время сохраняет положение, которое почти перпендикулярно к оси рядка.

Это обусловлено тем, что силы подпора, которые являются необходимым условием работы обычного лемешного копателя, при работе вибрационного копателя уже не имеют такого значения, а, следовательно, вероятность обламывания корнеплодов вследствие наклона оси корнеплода в направлении поступательного движения вибрационного копателя значительно уменьшается. При вибрационном выкапывании, в процессе вертикального перемещения, корнеплоды за счет придания им значительного ускорения интенсивно очищаются от налипшей почвы.

Таким образом, извлечение корнеплода из почвы при вибрационном выкапывании осуществляется за счет непосредственного захвата корнеплода вибрационным выкапывающим рабочим органом под действием возмущающей силы, передаваемой рабочим органом от механизма привода.

Из выше сказанного вытекает, что для исследования процесса извлечения корнеплода из почвы с помощью вибрационного выкапывающего рабочего органа необходимо рассмотреть непосредственный контакт корнеплода с рабочими поверхностями лемехов во время захвата корнеплода. Этот контакт может осуществляться непосредственно между рабочими поверхностями копателя и телом корнеплода, или такой контакт осуществляется через достаточно тонкий слой почвы.

Составим эквивалентную схему взаимодействия корнеплода с рабочими поверхностями вибрационного выкапывающего рабочего органа. Для чего представим вибрационный выкапывающий рабочий орган в виде двух клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$, каждый из которых в пространстве имеет наклон под углами α , β ,

γ и которые установлены таким образом друг к другу, что образуется рабочее русло, задняя часть которого сужается (рис. 1).

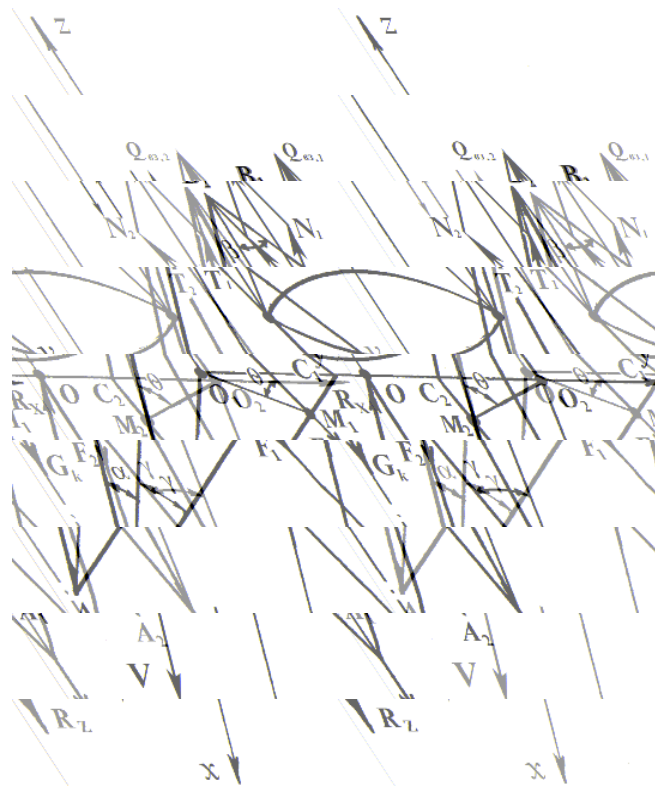


Рис.1 Силовое взаимодействие корнеплода свеклы с клиньями вибрационного рабочего органа

Fig.1 Power interaction of a root crop of beet with wedges of a vibrating working body

Указанные клинья осуществляют колебательные движения в продольно-вертикальной плоскости (механизм привода лемехов в колебательное движение не показан), направление поступательного движения вибрационного выкапывающего рабочего органа показано стрелкой. Свяжем с вибрационным выкапывающим рабочим органом прямоугольную декартову систему координат $Oxyz$, центр O которой находится посередине суженного русла копателя, ось Ox совпадает с направлением поступательного движения копателя, ось Oz имеет направление вверх, а ось Oy направлена в правую сторону копателя. Проекции точек B_1 и B_2 на ось Oy обозначим точками O_1 и O_2 соответственно.

Считается, что с поверхностями клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ в соответствующих двух точках взаимодействует корнеплод, который аппроксимируется телом конусообразной формы, находящимся внутри копателя, собственная ось которого параллельна оси Oz . Прямые, проведенные через точки контакта корнеплода с плоскостями клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ и точки B_1 и B_2 , образуют на пересечении со сторонами клиньев A_1C_1 и A_2C_2 соответствующие точки M_1 и M_2 . Таким образом, θ

– это двугранный угол (угол $B_1M_1O_1$) между нижним основанием $A_1O_1C_1$ и рабочей поверхностью клина $A_1B_1C_1$, или (угол $B_2M_2O_2$) между нижним основанием $A_2O_2C_2$ и рабочей поверхностью клина $A_2B_2C_2$.

Покажем силы, которые возникают вследствие указанного взаимодействия корнеплода с вибрационным выкапывающим рабочим органом. В точках контакта корнеплода с соответствующими поверхностями клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ действуют возмущающие силы $Q_{\text{вз.1}}$ и $Q_{\text{вз.2}}$, которые изменяются по следующему гармоническому закону:

$$Q_{\text{вз.1}} = Q_{\text{вз.2}} = \frac{1}{2} H \sin \omega t, \quad (1)$$

Вследствие действия данных сил в указанных точках контакта возникают нормальные реакции N_1 и N_2 со стороны поверхностей клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ соответственно и T_1 , T_2 – касательные составляющие возмущающих сил $Q_{\text{вз.1}}$ и $Q_{\text{вз.2}}$. Кроме этого, в указанных точках контакта действуют силы трения F_1 и F_2 , которые возникают при движении корнеплода по рабочим поверхностям клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ соответственно. Поскольку вибрационный выкапывающий рабочий орган имеет ось симметрии, то допуская, что корнеплод при его извлечении из почвы расположен именно на этой оси симметрии, считаем, что модули парных сил, которые возникают на соответствующих плоскостях клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ равны между собой. В центре тяжести корнеплода свеклы действует сила G_k – вес корнеплода, его сила связи (сцепления) с почвой обозначена, общей реакцией R , расположенной на оси симметрии корнеплода.

Составим дифференциальное уравнение движения корнеплода свеклы в процессе его извлечения из почвы. В векторной форме оно будет иметь такой вид:

$$m\bar{a} = \bar{N}_1 + \bar{N}_2 + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{R} + \bar{G}_k, \quad (2)$$

где m – масса корнеплода;

a – ускорение извлечения корнеплода из почвы.

Определим значения сил, входящих в выражение (2). Составляющие T_1 и T_2 возмущающих сил $Q_{\text{вз.1}}$, $Q_{\text{вз.2}}$ непосредственно на корнеплод не действуют, они вызывают лишь разрыхление почвы вокруг корнеплода, и, следовательно, в дифференциальное уравнение движения корнеплода не входят.

Из схемы рис. 1 получим выражения для определения нормальных N_i и касательных T_i составляющих возмущающих сил $Q_{\text{вз.1}}$ и $Q_{\text{вз.2}}$. Имеем:

$$N_1 = N_2 = Q_{\text{вз.1}} \cos \theta, \quad (3)$$

$$T_1 = T_2 = Q_{\text{вз.1}} \sin \theta. \quad (4)$$

Величины сил трения F_1 и F_2 определяются из таких выражений:

$$F_1 = F_2 = f N_1 = f Q_{\text{вз.1}} \cos \theta. \quad (5)$$

Очевидно, что, учитывая выше упомянутые условия работы вибрационных выкапывающих рабочих органов [Погорелый и др. 1983], при аналитическом исследовании процесса извлечения корнеплода свеклы из почвы необходимо рассмотреть две последовательные фазы:

первая – корнеплод прочно связан с почвой (закреплен в почве) и поэтому не может передвигаться вдоль оси Oz ;

вторая – связь корнеплода с почвой уже ослаблена (почти разрушена) и начинается его движение вверх, т.е. в направлении оси Oz .

Рассмотрим сначала первую фазу.

Для проведения тщательного анализа процесса извлечения корнеплода из почвы запишем дифференциальное уравнение (2) в проекциях на оси декартовой системы координат $Oxyz$.

Следует сразу заметить, что поскольку составляющие нормальных реакций N_i рабочих поверхностей $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ по оси Oy равны по величине и противоположно направлены, то извлечение корнеплода из почвы происходит фактически только в плоскости xOz , а поэтому векторное уравнение (1) сводится к системе двух уравнений такого вида:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= N_{1x} + N_{2x} + F_{1x} + F_{2x} - R_x, \\ m\ddot{z} &= N_{1z} + N_{2z} - F_{1z} - F_{2z} - R_z - G_k, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где: R_x, R_y – проекции силы связи корнеплода с почвой на соответствующие оси координат.

Определить проекции сил, входящих в систему уравнений (6), и подставив значения этих проекций в первое уравнение системы (6) получим следующие дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= H \cos \theta \sin \theta \sin \gamma \sin \omega t + \\ &+ f H \cos^2 \theta \sin \gamma \sin \omega t - R_x. \end{aligned} \quad (7)$$

Проанализируем процесс вибрационного извлечения корнеплода из почвы отдельно рассматривая уравнения, входящие в систему (6). Так, полученное уравнение (7) описывает вынужденные колебания корнеплода в почве вдоль оси Ox с нижним жестко закрепленным концом.

Очевидно, что данное уравнение имеет место при условии непосредственного контакта корнеплода с поверхностями клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$, то есть когда они движутся вверх. Это будет возможно при следующем условии:

$$0 \leq \sin \omega t \leq 1.$$

Если же имеет место противоположное неравенство такого вида

$$-1 \leq \sin \omega t \leq 0,$$

то это означает, что поверхности клиньев $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ движутся вниз.

Поскольку считаем, что корнеплод имеет конусообразную форму, то, при условии выполнения последнего неравенства, теряется непосредственный контакт корнеплода с поверхностями клиньев копателя, а значит за время отсутствия контакта корнеплод, за счет собственной упругости, успевает вернуться в вертикальное положение. Можно приближенно считать, что за время отсутствия контакта с поверхностями лемехов корнеплод осуществляет затухающие колебания вдоль оси Ox при наличии сопротивления и отсутствия возмущающей силы. С появлением нового контакта, вследствие изменения направления колебательного движения поверхностей лемехов и поступательного движения выкапывающего рабочего органа (русло в задней части копателя является заузненным), все повторяется сначала. Из выше сказанного вытекает, что при вибрационном извлечении из почвы корнеплод сохраняет почти вертикальное положение, что согласовывается с основными положениями, изложенными в [Погорелый и др. 1983].

Рассмотрим далее второе уравнение системы (6). Подставляя в данное уравнение значения проекций сил, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$m \ddot{z} = H \cos^2 \theta \sin \omega t - f H \cos \theta \sin \theta \sin \omega t - R_z - G_k. \quad (8)$$

Очевидно, что в первой фазе (корнеплод сильно связан с почвой) левая часть дифференциального уравнения (8) равняется нулю, а поэтому это уравнение превращается в уравнение статики, то есть уравнение равновесия корнеплода в почве вдоль оси Oz такого вида:

$$(H \cos^2 \theta - f H \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) \sin \omega t - R_z - G_k = 0 \quad (9)$$

При дальнейшем условии непосредственного контакта корнеплода с поверхностями $A_1B_1C_1$ и $A_2B_2C_2$ лемехов (то есть при условии $0 \leq \sin \omega t \leq 1$) осуществляются вынужденные продольные колебания корнеплода, рассмотренные в работе [Булгаков, Головач 2003]. При отсутствии контакта корнеплода с указанными поверхностями лемехов корнеплод осуществляет затухающие колебания вдоль оси Oz при наличии сопротивления. Таким образом, корнеплод при условии (9) все время осуществляет продольные колебания, или вынужденные или затухающие колебания при наличии сопротивления. Кроме этого, возникают ударные нагрузки при входе корнеплода в очередной контакт с лемехами. Все это приводит к интенсивному разрушению связей корнеплода с почвой, а следовательно нарушению условия равновесия (9) вследствие уменьшения величины силы R_z .

Таким образом, наступает момент времени, при котором вместо равенства (9) выполняется неравенство следующего вида:

$$(H \cos^2 \theta - f H \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta) \sin \omega t - G_k > R_z. \quad (10)$$

При условии (10) начинается движение корнеплода вверх, которое описывается дифференциальным уравнением (8).

Таким образом, перейдем дальше к рассмотрению второй фазы, когда корнеплод начинает двигаться в почве согласно дифференциального уравнения (8).

После двукратного интегрирования дифференциального уравнения (8) с учетом начальных условий получим выражение для определения скорости и перемещения корнеплода в процессе его извлечения из почвы:

$$\begin{aligned}\dot{z} &= -\frac{H}{m\omega}(\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) \cos \omega t - \frac{1}{m}(R_z + G_k) t + \\ &+ \frac{H}{m\omega}(\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta), \\ z &= -\frac{H}{m\omega^2}(\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) \sin \omega t - \frac{1}{m}(R_z + G_k) \frac{t^2}{2} + \frac{H}{m\omega} \times \\ &\times (\cos^2 \theta - f \cos \theta \sin \theta) t - h_1,\end{aligned}\quad (11)$$

где h_1 - глубина расположения (закрепления) корнеплода в почве.

Из второго уравнения (11) можно определить время t_1 извлечения корнеплода из почвы. Для этого необходимо в левую часть уравнения (11) подставить значение $z = 0$ и решить полученное уравнение относительно t_1 .

Поскольку данное уравнение является трансцендентным, то получить аналитическое выражение для определения t_1 невозможно, зато его можно решить на ЭВМ с помощью известных численных методов. Вычисленное значение t_1 можно применить для определения производительности агрегата для выкапывания корнеплодов вибрационными выкапывающими рабочими органами.

Выше было указано, что на протяжении времени, при котором корнеплод был закреплен в почве, уравнение (7) описывает вынужденные колебания вдоль оси Ox корнеплода в почве. Однако, когда корнеплод теряет связь с почвой и начинает двигаться вверх в почве, уравнение (7) описывает движение корнеплода вдоль оси Ox до полного его извлечения.

Следовательно, аналогично, после двукратного интегрирования дифференциального уравнения (7) с учетом начальных условий, определяем скорость и перемещение корнеплода вдоль оси Ox , то есть в направлении поступательного движения вибрационного выкапывающего рабочего органа:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\frac{H}{m\omega} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + f \cos^2 \theta) \cos \omega t - \frac{R_x}{m} t + \\ &+ \frac{H}{m\omega} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + f \cos^2 \theta), \\ x &= -\frac{H}{m\omega^2} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + f \cos^2 \theta) \sin \omega t - \frac{R_x}{2m} t^2 + \\ &+ \frac{H}{m\omega} \sin \gamma (\cos \theta \sin \theta + f \cos^2 \theta) t + x_0.\end{aligned}\quad (12)$$

где: x_0 - расстояние вертикальной оси корнеплода от начала системы координат (точка O) в момент времени $t = 0$.

ВЫВОДЫ

1. Построена расчетная математическая модель процесса вибрационного выкапывания корнеплода, т.е. составлена система дифференциальных уравнений движения тела корнеплода при взаимодействии с вибрационным выкапывающим рабочим органом.
2. С учетом полученных результатов исследования были разработаны новые конструкции вибрационных выкапывающих рабочих органов [Патенты України № 9709, 10723, 10724], использование которых улучшает качество выполнения данного технологического процесса.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Василенко П.М., Погорелый Л.В., Брей В.В. 1970:** Вибрационный способ уборки корнеплодов. Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. №2, с. 9–13.
2. **Булгаков В.М., Головач І.В. 2002:** Уточнена теорія викопуючого робочого органу лемішного типу. Вісник аграрної науки Причорномор'я. Спеціальний випуск 4(18). Том I. – Миколаїв: МДАУ, с. 37–63.
3. **Булгаков В.М., Головач І.В., Войтюк Д.Г. 2003:** Математичне моделювання поздовжніх коливань коренеплоду при вібраційному вилученні з ґрунту. Вибрації в техніці і технологіях. № 1(27), с. 11–14.
4. **Л.В. Погорелый, Н.В. Татьяна, В.В. Брей и др.;** Под общ. ред. **Л.В. Погорелого. 1983:** Свеклоуборочные машины (конструирование и расчет). Техніка, 168 с.
5. **Булгаков В.М., Головач І.В. 2003:** Теорія вібраційного викопування коренеплодів. Збірник наукових праць Національного аграрного університету. Механізація сільськогосподарського виробництва. Том XIV, с. 34–86.
6. **Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Войтюк Д.Г., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М., 1996:** Віброкопач для коренеплодів. Патент України № 9709, опубл. в бюл. № 3.
7. **Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Войтюк Д.Г., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М. 1996:** Віброкопач для коренеплодів. Патент України № 10723, опубл. в бюл. № 4.
8. **Булгаков В.М., Зиков П.Ю., Войтюк Д.Г., Цурпал І.А., Фінько С.В., Савченко А.М. 1996:** Віброкопач для коренеплодів. Патент України № 10724, опубл. в бюл. № 4.

THE THEORY OF ROOT CROPS VIBRATIONAL DIGGING UP PROCESS

Summary. The mathematical model of sugar beet root crops vibration – digging up process is created. Thus, the sugar beet root crop is solidified, and the vibration – digging up tool makes oscillations in a longitudinal – vertical plane.

Key words: Root crop, vibrating digging out tool, mathematical model, power circuit, differential equations

Reviewer: Dmytro Voytiuk, Prof. Sc. D.