

4 Шероховатость поверхности пропила с увеличением затупления зубьев пил увеличивается для обоих способов пиления. При попутном пилении шероховатость поверхности пропила меньше, чем при встречном.

5 Характер и степень затупления инструмента, оснащенного пластинками твердого сплава, не зависят от способа пиления. При попутном и встречном пилении древесины износ происходит равномерно по передней и задней граням зуба граням с постепенным увеличением радиуса округления режущей кромки.

Выявленные особенности попутного пиления говорят о необходимости дифференцированного подхода к данному вопросу и позволяют более целесообразно назначать режимы пиления на станках с попутной подачей.

Уфимцев В.Я., Пушкарева О.Б., Шабалина Н.Р., Воронцова Т.Г.
(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ) us_lmf@mail.ru

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ САМОРАСКАЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КРУПНЫХ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

THE MACROSCOPICAL OCCURRENCE REASONS OF ELECTRIC DRIVES SELF-ROCKING LARGE WOODWORKING MACHINES

В системах электроэнергоснабжения (СЭС) могут возникать [1] самовозбуждение и самораскачивание роторов машин. Явления самовозбуждения (СВ) и самораскачивания (СР) - понятия с пересекающимися признаками: замечено, что увеличение емкостной компенсации ЛЭП может вызывать и то и другое явление. Другим общим признаком этих явлений, находящимся в существенно иной предметной области, является способ анализа СВ и СР - система уравнений Парка – Горева. При этом можно отметить и различие в постановке проблем анализа СВ и СР: математическая модель системы для рассмотрения СР включает дифференциальное уравнение движения ротора машины, например, в виде $\ddot{q} = M - M_c$, призванное связать механическую цепь машины с электрическими. Однако, приведенное уравнение зачастую малозаметно, но далеко не в силу его лаконичности в сравнении с остальными.

Известно [2], что на основе принципа Гамильтона динамическое состояние механической системы (в данном случае - ротора) полностью определяет одновременное задание обобщенных координат q и \dot{q} . С математической точки зрения это значит, что заданием q и \dot{q} в некоторый момент времени однозначно задается так же и значение ускорения \ddot{q} в этот момент. В таком отношении приведенное выше дифференциальное уравнение движения ротора не является полным, по этой причине не будет полной и любая сколь угодно строгая система уравнений, включающая пробел в одном из них. Следует отметить еще одно отрицательное свойство приведенного уравнения: оно никогда не дает т.н. [3] колеблющихся решений и пригодно только для анализа аperiodических переходных процессов, а явления СВ и СР, как показывают наблюдения [1], ха-

рактируются колебательными процессами, выросшими в недрах стационарных.

Нужно признать, что введение полного дифференциального уравнения движения ротора на основе функции Лагранжа $L(q, \dot{q}, \ddot{q}, t)$ вряд ли упростит структуру математической модели машины, содержащей десятки строк дифференциальных уравнений и без того ставящей проблему неразрешенности - анализ такой модели, чаще всего ведется опосредованно на основе критериев устойчивости систем, упрощающих условий, допущений, посылок и т.д.. Таким образом, возникает существенное противоречие и вместе с тем проблема современной теории СЭС, которые вряд ли преодолимы на сегодняшнем уровне знаний, в частности об электрической машине. Отсюда следует, что нужны иные средства познания явлений СР и СВ. И этим средством может послужить макроскопическая теория машины, позволяющая включить машину любого вида (синхронную, асинхронную, МПТ и т.д.) в единый класс понятий, в частности, и с ЛЭП, как с системой с распределенными параметрами.

Можно показать средствами макроскопической теории [4], что модель машины сводима к магнитной схеме замещения (рис. 1а), инвариантной как роду, так и режиму работы с параметрами:

$$R_2 = (\bar{\sigma} + \overline{\sigma^2})R + \overline{\sigma^2}(R_L - R_C - R_{CB}); L_2 = (\bar{\sigma} + \overline{\sigma^2})L; C_2 = \frac{w^2 r_2}{\omega_1 s}, \quad (1)$$

где $R_L - R_C$ - активное магнитное сопротивление, определяемое индуктивным (R_L) и емкостным (R_C) электрическими сопротивлениями, включенными в цепь вторичной обмотки;

R_{CB} - активное магнитное сопротивление машины, вносимое обмоткой возбуждения.

Машина, как правило, работает в режиме, близком к электродинамическому резонансу (ЭДР). Существенный признак ЭДР – движение ротора, например, синхронной машины с номинальной частотой ω_1 , при минимальном значении магнитного напряжения. Не трудно понять, что машина должна быть подчинена условию $\omega_1 = \omega_0$ (ω_0 - частота собственной волны движения ротора). Этому условию, в частности, соответствует посылка: число полюсов обмотки статора должно быть равно числу полюсов ротора. Это одна из очевидных, существенных взаимосвязей между параметрами машины. Уравнение для контура (см.рис 1б) с параметрами (1), в целях упрощения выкладок, можно привести к виду:

$$\ddot{q} + 2n\dot{q} + k^2 q = h \sin(pt + \delta); \quad (2)$$

$$q = \dot{\Phi}_2; 2n = \frac{R_2}{L_2}; k^2 = \frac{1}{L_2 C_2}; k = \sqrt{k^{*2} - n^2}; p = \omega_1; k = \omega; h = U_{1m}, \quad (3)$$

где k^* - частота собственных волн электромагнитного поля;

$k = \omega$ - частота свободных волн того же поля.

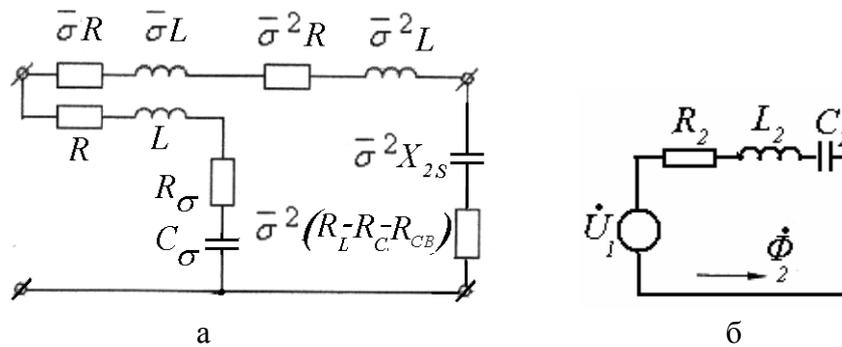


Рисунок 1 – К электродинамическому резонансу: а -Г-образная магнитная схема замещения машины; б - резонансный магнитный контур

Общее решение уравнения (2) можно записать:

$$q = e^{-nt} (C_1 \cos kt + C_2 \sin kt) + \frac{h}{k} \varkappa \sin(pt + \delta);$$

$$\varkappa = \left[\sqrt{\left[1 - \left(\frac{p}{k} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{2n}{k} \frac{p}{k} \right)^2} \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$q = 2A(1 - e^{-nt}) \cos \frac{\varepsilon}{2} t \sin kt + 2A \sin \frac{\varepsilon}{2} \cos kt + A(1 - e^{-nt}) \sin kt, \quad (5)$$

где C_1, C_2, A – постоянные, определяемые из начальных условий.

Определяя ЭДС фазы обмотки с учетом введенных в (3) подстановок, можно описать процесс самовозбуждения машины на основе (4), (5) для:

резонансного режима (рис.2а) движения ротора ($\omega_1 = \omega_0$)

$$\varepsilon \approx E_m \sin(\omega_1 t + \theta) + e^{-nt} E_m t \cos(\omega t + \theta); \quad (6)$$

околорезонансного режима (рис.2 б) движения ротора ($\omega_1 \approx \omega_0$)

$$\varepsilon = E_m (1 - e^{-nt}) \sin \omega t - \left(2E_m \sin \frac{\varepsilon}{2} t \cos \omega_1 t \right) + 2E_m (1 - e^{-nt}) \cos \frac{\varepsilon}{2} \sin \omega t. \quad (7)$$

Полученные аналитические выражения процессов самовозбуждения машины хорошо совпадают с зафиксированными [1] результатами наблюдений с соответственно с синхронным и асинхронным СВ и могут иметь следующую интерпретацию.

Апериодический процесс. Первое слагаемое в (6) соответствует предыстории процесса самовозбуждения машины - стационарному режиму; второе - возникает вследствие переходного процесса. Переходный процесс происходит на свободной частоте волны ЭДС, равной $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - (R_2/2L_2)^2}$.

Запись $t \cos \omega t$ соответствует бесконечному возрастанию ЭДС во времени по закону прямой пропорциональности (рис. 2а, огибающая 2). Однако поглощение волн по мере их распространения в машине, в частности на магнитном сопротивлении R_2 , ограничивает (см. рис.2 а, огибающая 3) этот рост (запись $(- \exp(nt))$). Магнитное сопротивление R_2 может возрасти в процессе переходного процесса конкретно по причине нелинейности магнитной цепи машины. Приведённое суждение сохраняет преемственность с имеющимся знанием на этот счёт [1], но абстрагировано, что позволяет

кроме названной конкретной причины ограниченного роста ЭДС при самовозбуждении, предвидеть и другие.

Процесс аperiodического самовозбуждения (АСВ) возникает из стационарной работы СЭС (см.рис.2а, график 1). Основной, общий мотив формирования АСВ содержится в условии $\omega_0 = const$. Тогда можно иметь

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \bar{\sigma} \sqrt{\frac{r}{r_2(\bar{\sigma} + \bar{\sigma}^2)}} = const, \quad (8)$$

где r - сопротивление обмотки, обусловленное потерями в стали статора;

r_2 - сопротивление обмотки статора, определяемое электромеханическим преобразованием энергии в т.ч. и сопротивлением ЛЭП.

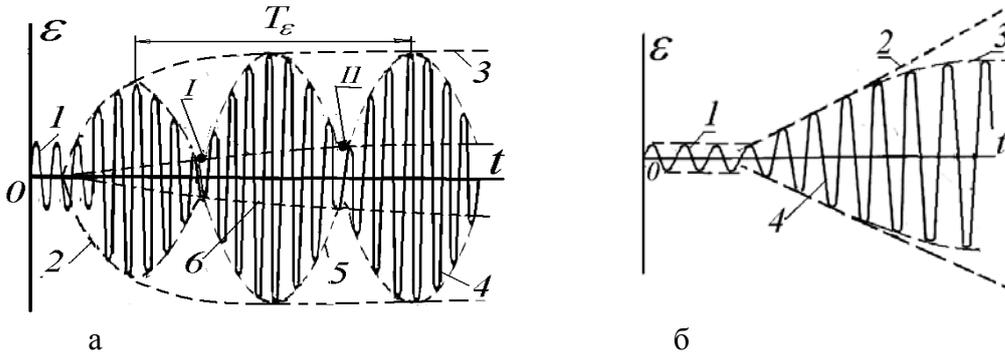


Рисунок 2 – Представление аperiodического (а) и периодического (б) СВ: 1 - собственные (вынужденные) волны ЭДС; 2- без учёта поглощения (затухания) волн; 3 - с учётом поглощения; 4 - волны свободной частоты (переходного процесса); 5 - огибающая биеений; 6 - огибающая затухающих (свободных) волн напряжения сети.

При набросе нагрузки машины сопротивление r_2 достаточно быстро, со временем электрического переходного процесса, уменьшится. Тогда, при кажущейся неизменной частоте вращения ротора, сопротивление r должно уменьшиться так же быстро и в той же мере, что поведёт за собой всплеск энергии потерь в стали статора. Любое изменение нагрузки ЛЭП вызывает на зажимах машины отражение волн электромагнитного поля. Эти волны имеют различные фазовые скорости $v_n = c$ - для ЛЭП и $v = 2\pi f$ - для машины. Скорости эти не соизмеримы - $c \gg 2\pi f$, поэтому можно показать [4], что волны, как материальные среды с плотностью EH/c^3 [6], сталкиваясь на зажимах машины создают зону с большим механическим сжатием двух сред, что влечёт за собой всплеск - импульс энергии в месте проникновения в машину. Он и создаёт виртуальный эффект резкого снижения r и обеспечивает толчок для начала процесса СВ. Импульс (концентрация) энергии электромагнитного поля – аномальный кратковременный процесс, в результате которого ротор получает механический удар, «спотыкается» при своем вращении, а затем быстро восстанавливает свое движение. Аналогичную ситуацию можно представить и при сбросе нагрузки машины - резкому выключению потребителей энергии в СЭС. Разница будет заключаться в том, что всплеск энергии можно ожидать на прилегающем к машине начале ЛЭП.

Эффект удара по вращающемуся ротору можно проиллюстрировать и с иных позиций. Из (8) следует, что частота собственных волн машины величина комплексная,

поэтому из (3) можно записать

$$\omega_0 = \omega + j2n, \quad (9)$$

откуда следует, что понятие частоты собственной волны машины включает в свое содержание важный признак - это функция, которую можно определить как

$$\tilde{\omega}_0 = \Omega_{0m} e^{j\theta_\varepsilon}; \theta_\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{2n}{\omega} = \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon_4}{\omega},$$

где Ω_{0m} - амплитудное значение частоты волны вращения ротора;

θ_ε - угол нагрузки, обусловленный искажениями в машине.

Таким образом, машина с искажениями имеет относительный признак – начальную фазу θ_ε , зависящую от потерь энергии. Обобщая выявленный таким образом существенный признак собственной частоты машины как комплексной величины, можно иметь

$$\tilde{\omega}_0 = \Omega_{0m} e^{j\theta},$$

где θ – угол нагрузки машины, включающий, в частности, и θ_ε .

Высказанное суждение относится к одному из отличительных признаков собственной частоты машины: оставаясь неизменной внешне - по модулю в различных переходных и других процессах, она при этом изменяет свою фазу, т.е. по существу является варифазной: $|\omega_0| = \text{const}; \theta = \text{var}$. Последнее представление является посылкой для следующего суждения: механический удар по стационарно вращающемуся ротору абстрагируется внезапным изменением начальной фазы θ волны вращения ротора, которое, в свою очередь, происходит при любых изменениях нагрузки (θ) в ЛЭП.

Периодическое СВ. Причины периодического (7) самовозбуждения (ПСВ) те же, что и для АСВ, но процесс здесь несколько сложнее (рис.2б). Так, «споткнувшийся» в момент коммутации в ЛЭП, ротор дает провал ЭДС до нуля (график 1), что объясняется виртуальным КЗ в обмотке статора, обусловленным внезапным уменьшением r , затем эта ЭДС, равная, примерно, напряжению сети, восстанавливается в машине до первоначального значения. Одновременно возникает процесс биений ЭДС: стационарных и затухающих со временем (графики 2,3). Общее представление о ПСВ графически складывается из перечисленных частных случаев и содержит вполне конкретную картину, содержащую следующие существенные признаки:

- процесс происходит в форме стабилизирующихся со временем биений;
- самовозбуждение проявляется при $\omega = \omega_1 - \varepsilon_4$ в виде амплитудно-модулированных волн ЭДС свободной частоты;
- глубина модуляции волн ЭДС изменяется со временем (точки I и II рис.2 б) и находится в зависимости от функции $(1 - e^{-nt})$;
- значение боковой частоты (ε_4) зависит от параметров машины, а также и ЛЭП.

Постоянная затухания $\varepsilon_4 = n$, равная отношению $R_2/2L_2$, включает в числитель, кроме прочих, опосредованные параметры (1) возбужденности машины (R_{CB}) и емкость ЛЭП (R_C). Последняя не зависит от нагрузки и условий работы машины, а величину R_{CB} можно варьировать средствами, например, АРВ. Отсюда вывод: вследствие врожденной инерции ОВ машины, регулирующие воздействия АРВ или персонала генерирующей станции не могут успеть и тем более опередить, предотвратить быстро-

развивающиеся переходные процессы в цепях статора, заканчивающиеся СВ. С другой стороны, относительно большое сопротивление ЛЭП, введенное в r_2 , и учитываемое выражением $n = R_2/2L_2 = r_2/2x_2$, дает неколеблущееся решение уравнения (2) в форме

[2] $q = Ae^{-nt} \operatorname{sh} t \sqrt{n^2 - k^2} + \beta$, описывающее монотонно затухающий переходный процесс без СВ. Теперь можно конкретизировать часто применяющееся понятие [1] большого сопротивления ЛЭП: это $n \geq k$. Устойчивость против СВ при большом сопротивлении шин установлена в ходе многочисленных наблюдений [1]. С другой стороны, зарядные мощности генератора и ЛЭП, используемые иногда в качестве критериальных, могут быть таковыми только отчасти. Полученный выше вывод может служить ответом и на не прекращающуюся до сих пор полемику [7] о роли переходных процессов в цепях статора на СВ в машинах. Приведенные рассуждения показали, что именно переходные процессы в цепях статора полностью определяют процессы СВ.

Осуществленный анализ показал, что грань между АСВ и ПСВ весьма деликатна. В первом случае должно возникнуть условие $\omega = \omega_1$, а во втором $\omega_1 = \omega + \varepsilon_4$, где ε_4 - малая величина. Общим признаком понятия «самовозбуждение машины» является его причина – изменение параметров ЛЭП и следующий затем механический удар по ротору, который не в силах зримо изменить частоту его вращения, но является началом других взаимосвязанных процессов в машине – самовозбуждения и самораскачивания, а синхронные и асинхронные процессы в машине [1] для СВ нужно считать опосредованными.

Прецессия ротора. Возвращаясь к равенству (9) и располагая ортогональные компоненты в декартовых осях соответственно: $\omega_0 \rightarrow y$; $\omega \rightarrow x$; $2n \rightarrow z$, можно получить уравнение поверхности, порождаемой вращением линии ab (рис.3 а) около оси oy $y = \operatorname{ctg} \theta \sqrt{x^2 + z^2}$ или $\omega_0 = \operatorname{ctg} \theta \sqrt{\omega^2 + (R_2/2L_2)^2}$.

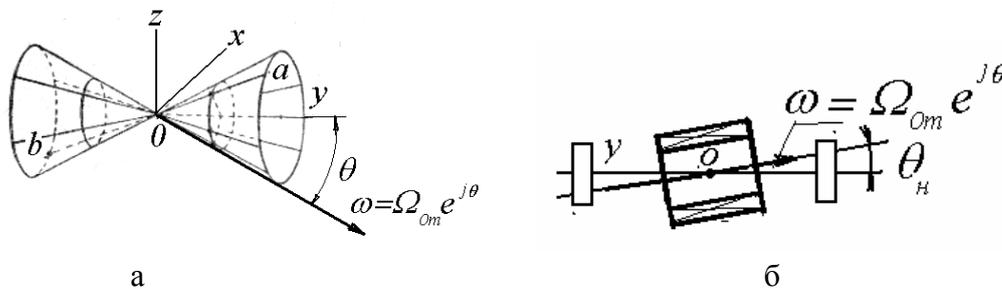


Рисунок 3 – Прецессия ротора

Последнее уравнение описывает сложное движение концов вала любой машины в форме прецессии – движения твердого тела, имеющего неподвижную точку o (рис.3б), которое складывается из вращения с частотой ω вокруг оси ротора и вращения с частотой $\varepsilon_4 = n$ вокруг оси oy . В идеале угол нагрузки θ и угол нутации θ_n (см.рис.3 б) одинаковы, но реально движение шипов вала ротора ограничено зазорами подшипников. На практике этот процесс можно обнаружить по характерному шуму, сопровождающему, например, разгон ротора при пуске двигателя с изношенными (и не только) подшипниками. В процессе разгона меняется величина угла нагрузки, изменяется и тональность звука его сопровождающего.

Магнитные емкость и индуктивность. Обращаясь к известному [4] выражению коэффициента рассеяния, подставляя в него вместо электрических сопротивлений магнитные, можно получить:

$$\bar{\sigma} = 1 + \left[(RG + \omega_1^2 LC) - j\omega_1(RC - LG) \right]; \quad \beta_0 x = \arctg \frac{\omega_1(RC - LG)}{1 + [(RG + \omega_1^2 LC)]};$$

$$\sigma_m = \sqrt{\{1 + [(RG + \omega_1^2 LC)]\}^2 - [\omega_1(RC - LG)]^2};$$

$$\Phi_{\sigma\theta} = \Phi_{ad} \sigma_m \sin \beta_0 x; \quad \Phi_{\sigma\theta} = U_{1m} (G_{m\sigma\theta} \sin \beta_0 x);$$

$$\Phi_{\sigma m} = \Phi_{ad} \sigma_m \cos \beta_0 x; \quad \Phi_{\sigma m} = U_{1m} (G_{m\sigma m} \cos \beta_0 x).$$

Отсюда следует, что индуктивности обмоток машины, пропорциональные $(G_{m\sigma\theta} \sin \beta_0 x)$ и $(G_{m\sigma m} \cos \beta_0 x)$ являются периодическими функциями перемещения ротора (x) , а это, как известно [5] является непременным условием получения однонаправленного преобразования энергии в машинах. Таким образом, из всей совокупности проведенных рассуждений, а также близости их результатов к данным наблюдений, можно вывести опосредованное умозаключение: введенные в математическую модель машины гипотетические параметры, в частности, L и C приводят к следствиям, совпадающим с данными наблюдений и истинными знаниями [5], а поэтому могут считаться обоснованными и научно доказанными понятиями теории машин. Кроме того, из последних равенств следует, что магнитное рассеяние как понятие имеет в своем содержании важный признак – взаимосвязь $\sigma = \sigma_m \exp(-j\beta_0 x \pm \theta)$ между продольной и поперечной магнитными проводимостями рассеяния и определяет на основе взаимнооднозначного отношения собственную пространственную частоту β_0 машины. При нерасчетливой организации магнитного рассеяния, можно столкнуться с неожиданно появившимися полигармоничными пространственными волнами поля, создаваемого обмотками машины при $\sigma = \sigma_m \exp(-j \sum \beta_{k0} x \pm \theta_k)$.

Завершая рассуждения о процессах АСВ следует заметить что для исключения таких процессов, обе системы с распределенными параметрами (машина, ЛЭП) должны иметь одинаковые входные сопротивления (Z_2 и $Z_{2л}$). В противном случае необходимо согласовать их каким либо образом, например [8], включая между машиной и ЛЭП отрезок ещё одной линии длиной $\lambda/4$ (или эквивалентную ей электрическую цепь) с автоматически регулируемым волновым сопротивлением $Z = \sqrt{Z_2 Z_{2л}}$.

Выводы

Разработана математическая модель электрической машины, инвариантная к числу фаз, режим и ее виду.

Введены и обоснованы понятия магнитных индуктивности и емкости.

Определено содержание понятий собственная и свободная частоты циклических волн машины.

Вычислена функция собственной частоты вращения ротора как векторной величины.

Доказано, что самовозбуждение с необходимостью связано с переходными процессами в статоре машины.

Аналитически выведено, что синхронное самовозбуждение машин в системах электроснабжения происходит при совпадении численных значений частот собственных и свободных волн скоростей ротора (в электродинамическом резонансе), а асинхронное – при их малом расхождении (в околорезонансном режиме движения ротора).

Конкретно сформулировано понятие относительного значения большого сопротивления ЛЭП.

Найдено уравнение вращения оси ротора как функции угла нагрузки машины.

Описана принципиальная роль магнитного рассеяния и потерь в стали статора в процессах самовозбуждения машины.

Показано, что магнитное рассеяние в машине определяется волнами дифракции (продольными), рефракции (поперечными) и нагрузкой машины.

Сформулирована конструктивная роль магнитного рассеяния в создании структуры пространственных волн магнитного поля машины.

Библиографический список

1. Веников В.А. и др. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах/ В.А. Веников, Н.Д. Анисимова, А.И. Долгинов, Д.А. Федоров. - М.: Высшая школа, 1964.-198с.
2. Яблонский А.А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. - М.: Высшая школа. 1996.- 255с.
3. Смирнов В.И. Курс высшей математики: Учебное пособие для студентов вузов.- 21-е изд. - М.: Наука 1974.-Т.II.650с.
4. Уфимцев В.Я.Макроскопический анализ электродинамических процессов в электрических машинах. Теоретические основы электромеханики. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т. 536с.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Энергия. 1980.- 928с
6. Поливанов К.М. Теория электромагнитного поля. - М.: Энергия. 1969. -352с.
7. Костюк О.М., Соломаха М.И. Колебания и устойчивость синхронных машин/- Киев. Наукова думка,1991.-200с.
8. Шимони К.А. Теоретическая электротехника. - М.: Мир, 1964.- 774с.

Максименков А.И., Королева И.С. (ВГЛТА, г. Воронеж, РФ)

kafedramehaniza@mail.ru

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ЛЕНТОЧНОМ ЛЕСОПИЛЕНИИ

ABOUT CAPABILITY THE SAVINGS OF RESOURCES AT THE WOOD TAPE SAWING

Задача комплексного использования древесного сырья связана с его рациональной переработкой. При существующей технологии переработки и применяемом оборудовании (лесопильные рамы и круглопильные станки), деловой выход древесины с учетом пороков,