

УДК 676.056.71:62-26

Б.Ф. Балеев

ИССЛЕДОВАНИЯ КАЛАНДРОВЫХ БАТАРЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вынужденные колебания валов каландровых батарей при нагрузках импульсного характера. Импульсные силы возникают от впадин на бумажном полотне, образуемых верхним валом батареи, который движется в автоколебательном режиме, получая энергию от привода батареи через обратную связь при движении вала вниз под действием силы тяжести. Впадины, проходящие последовательно между каждой парой валов, вызывают вынужденные колебания системы, которые являются причиной неравномерного износа поверхностей валов, наблюдаемых в виде тёмных и светлых полос по всей длине, и влияющих на интенсивность колебаний. Выполнена теоретическая оценка интенсивности неравномерного износа по относительным скоростям валов и величинам давлений в захватах. Относительные скорости поверхностей валов определены на натуральных машинах. На экспериментальной установке, моделирующей условия в захватах, определены перемещения пары сталь-бумага при разных соотношениях нормальных и тангенциальных сил. Принятая модель износа согласуется с износом на валах по частоте их замены.

Ключевые слова: вынужденные колебания, автоколебания, импульсные силы.

Каландровая батарея бумагоделательной машины представляет собой систему валов, расположенных в вертикальной плоскости. Между валами пропускается бумажное полотно так, что оно движется сверху вниз, огибая все валы, кроме верхнего. Давление между валами нарастает, достигая максимума в нижнем захвате. Захватом называют зону контакта между двумя соседними валами. Таким образом, бумажному полотну придают определённую плотность, гладкость, толщину и прочность. Скорость полотна около 10 м/с, ширина 9 м, массы валов до 50 т (нижний) и до 12 т (верхние).

Как было установлено, каландровая батарея входит в режим автоколебаний, что приводит к дефектам бумажного полотна – переменной толщине с периодическими впадинами глубиной от 7 до 20% толщины бумажного полотна, что наблюдается в виде равномерно расположенных полос по всей его ширине. Эти дефекты приводят к повышенной вибрации разрезных станков и печатных машин, ухудшают качество печати и являются частыми причинами обрывов бумаги в батарее и при печати.

Поверхности валов при вибрации батареи получают неравномерный износ и наблюдаются в виде чередующихся тёмных и светлых полос постоянной ширины и шага. Высота неровностей возрастает со временем, достигая 7,5 мкм. Интенсивность увеличения высоты со временем растёт, что соответствует одновременному росту глубины впадин на бумажном полотне. Возникает необходимость периодического шлифования валов, приводящая к уменьшению поверхностного твёрдого слоя отбелённого чугуна и увеличению скорости неравномерного износа, что в свою очередь ведет к более частым перешлифовкам. Неравномерный износ исследован теоретически и экспериментально на натуральных машинах и экспериментальной установке, воспроизводящей условия в разных захватах. Сила трения в захватах много меньше силы трения скольжения, однако перемещения поверхностей происходят при любом соотношении нормальных и тангенциальных сил. Это явление было обнаружено профессором политехнического института А.В. Верховским и называлось «явлением предварительного смещения при трогании несмазанных поверхностей с места». Были обнаружены две компоненты смещения – упругая и остаточная деформации при нагрузке – разгрузке, возникающие при любом соотношении нормальных и тангенциальных сил, меньших предельного значения, определяемого скольжением. Аналогичный эффект был обнаружен и на экспериментальной установке для пары сталь – бумага. Кроме того, был обнаружен новый эффект: при периодических нагрузках – разгрузках одной и той же тангенциальной силой при постоянной нормальной силе возникают одинаковые петли гистерезиса, но с каждым

циклом перемещаются в направлении тангенциальной силы. В захвате батареи действует постоянная тангенциальная сила, поэтому смещение поверхностей равно сумме упругой и остаточной деформаций. Вследствие указанного эффекта скорости поверхностей смежных валов будут разными, но это не скольжение в принятом смысле, а смещения при неполной силе трения.

Резкое возрастание амплитуд колебаний проявилось в связи с увеличением скорости и ширины бумагоделательных машин. Исследованиями установлено, что в каландровой батарее возникают автоколебания, вызванные особыми условиями её верхнего вала, который имеет свободу перемещения вверх. Экспериментальные исследования показали, что малую часть периода вал движется с ускорением около $7g$, а большую часть периода – с ускорением свободного падения – g , т.е. нагрузка носит импульсный характер. Упругие свойства бумаги незначительны, поэтому вся энергия верхнего вала в фазе падения переходит в неупругую деформацию бумаги, образуя впадину по всей ширине полотна. Затем вал движется вверх по боковой поверхности впадины за счёт горизонтального движения бумажного полотна, использующего энергию привода батареи. Вертикальное движение вала принимает автоколебательный характер, так как образуемая валом впадина обеспечивает его движение вверх, а движение вниз происходит под действием силы тяжести. В системе имеются все элементы, необходимые для поддержания автоколебаний: колебательная система, в которой упругий элемент отсутствует, а его роль выполняет сила тяжести, возвращающая вал в положение равновесия; источник энергии – привод батареи; обратная связь, обеспечиваемая движением вала вниз, когда он образует впадину на бумажном листе, являющуюся источником для движения вверх.

Свободные колебания системы были рассмотрены ранее. Для анализа вынужденных колебаний воспользуемся методом приведения. При известных формах главных колебаний системы, определение вынужденных колебаний выполняется способом разложения по собственным формам колебаний. При этом каждое из главных колебаний можно рассматривать как колебание, обладающее лишь одной степенью свободы, поэтому к нему могут быть применены все выводы динамического расчёта такой системы.

Перемещения системы вполне определяются перемещением какой-либо одной её точки. Приведённые к точке масса M и сила Q определяются следующими выражениями:

$$M = m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_i x_i ;$$

$$Q = Q_1 x_1 + Q_2 x_2 + \dots + Q_i x_i ,$$

где m_i – массы системы; x_i – перемещения масс, определяющие форму рассматриваемого главного колебания; Q_i – силы, действующие на массы.

Известно, что всякую нагрузку, действующую в течение времени T , можно разложить в ряд Фурье, т.е. представить в виде суммы нагрузок, изменяющихся по синусоидальному закону.

Если в начальный момент времени значения заданной нагрузки равны нулю, то общий член разложения имеет вид:

$$F(\xi) = Q_k \sin \frac{k\pi\xi}{T} ,$$

где Q_k – наибольшая ордината нагрузки в члене разложения с k полуволнами; T – продолжительность действия нагрузки.

При известном законе изменения нагрузки перемещение системы в любой момент времени t определяется из выражения:

$$y = \int_0^t F(\xi) \sin p(t - \xi) d\xi / pM ,$$

где $p = \pi/\tau$; τ – полупериод свободных колебаний системы.

При $t < T$

$$y_k = Q_k \int_0^t \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM =$$

$$= Q_k \tau^2 T^2 \left[\sin \frac{k\pi t}{T} - \frac{k\tau}{T} \sin \frac{\pi t}{\tau} \right] / \pi^2 M (T^2 - k^2 \tau^2).$$

При $t > T$

$$y_k = Q_k / \int_0^T \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM =$$

$$= Q_k \tau^3 k T^2 \left\{ (-1)^k \sin \frac{\pi T}{\tau} \cos \frac{\pi t}{\tau} + \left[1 - (-1)^k \cos \frac{\pi T}{\tau} \right] \sin \frac{\pi t}{\tau} \right\} / \pi^2 M (k^2 \tau^2 - T^2).$$

Замечая, что $Q_k \tau^2 T^2 / \pi^2 M = Q_k / C = y_{ст}$, и обозначив $\tau/T = \alpha$, при $t < T$, получим:

$$y_k = y_{ст} \left[k\alpha \sin \frac{\pi t}{\tau} - \sin k\alpha \frac{\pi}{\tau} \right] / k^2 \alpha^2 - 1.$$

При $t > T$ будем иметь:

$$y_k = y_{ст} \left[\sin \frac{\pi t}{\tau} - (-1)^k \sin \frac{\pi}{\tau} (t - T) \right] / k^2 \alpha^2 - 1.$$

Максимальное перемещение при $t > T$ определяется из предыдущего выражения, если

$$dy/dt = 0.$$

При $k = 1$ получим: $y_{\max} = y_{ст} 2\alpha \cos \frac{\pi}{2\alpha} / \alpha^2 - 1.$

Д о п у щ е н и я

1. Форма впадины на бумажном листе принята в виде полуволны синусоиды.
2. Нагрузка, возникающая в захвате, также имеет синусоидальный характер, так как она определяется ускорением при движении вала по поверхности впадины.
3. Глубина впадины изменяется так же, как толщина листа по мере каландрирования, а форма остаётся синусоидальной.
4. Бумага считается полностью неупругой средой.
5. Рассматривается движение недеформируемого цилиндра по недеформируемой поверхности, имеющей впадины синусоидальной формы, расположенные с некоторым интервалом.
6. Затуханием пренебрегаем.

Из принятой модели возбуждения колебаний в каландровой батарее очевидно, что нагрузка имеет импульсный характер.

Перемещение массы после действия каждого импульса может быть определено (для $t > T$) из следующих выражений:

$$y_1 = Q_k \int_0^T \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM;$$

$$y_2 = Q_k \int_0^T \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM + Q_k \int_{t_0}^{t_0+T} \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM =$$

$$= y_1 + Q_k \int_{t_0}^{t_0+T} \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM ;$$

$$y_n + + Q_k \int_{(n-1)t_0}^{(n-1)t_0+T} \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM + y_{n-1},$$

где t_0 – интервалы времени, через которые нагрузка действует на массу.

Интегрируя последнее выражение, получим перемещение массы после n -го импульса (при $k = 1$):

$$y_n = y_{n-1} + 2y_{ст} \cos \frac{\pi}{2\alpha} (\sin \beta \cos \gamma - \alpha \cos \beta \sin \gamma) / (1 - \alpha^2),$$

где $\beta = \pi (n - 1) t_0 / T$; $\gamma = \frac{1}{\tau} \pi [t - (n - 1)t_0] + T/2$.

Из экспериментальных данных известно, что колебания валов в каландровой батарее происходят по второй форме колебаний системы. Согласно изложенному, выполним приведение системы для второй формы колебаний к точке, соответствующей пятой массе, так как шестая масса находится в особых условиях – происходит отрыв вала от бумажного листа при колебаниях.

При движении впадины на бумаге через $i, i+1$ захват величину силы $Q_{i,i+1}$ определим из выражения:

$$Q_{i,i+1} = m_{i+1} d^2 y_{i+1} / dt^2 + C_{i+1, i+2} y_{i+1} / \Delta,$$

где $\Delta = m_{i+1} / 2m_i$.

При вычислениях оказалось, что членом $C_{i+1, i+2} y_{i+1} / \Delta$ можно пренебречь, так как он на порядок меньше члена $m_{i+1} d^2 y_{i+1} / dt^2$.

Следует иметь в виду, что одновременно на массы m_{i-1} и m_{i+2} будут действовать силы, определяемые перемещением масс m_i и m_{i+1} и жесткостями $C_{i,i-1}$ и $C_{i+1,i+2}$. Эти силы также можно не учитывать ввиду их относительной малости.

Согласно экспериментальным данным, глубина впадины на листе, полученная в верхнем захвате, уменьшается по мере каландрирования в такой же степени, как изменяется толщина листа, поэтому получим следующие значения глубины впадин в каждом захвате (мм):

$$y_{56} = 0,015; \quad y_{45} = 0,012; \quad y_{34} = 0,009; \quad y_{23} = 0,006; \quad y_{12} = 0,003,$$

При этом получены максимальные значения сил в захватах (Н):

$$Q_{56} = 15,5 \cdot 10^5; \quad Q_{45} = 12,4 \cdot 10^5; \quad Q_{34} = 9,3 \cdot 10^5; \quad Q_{23} = 6,3 \cdot 10^5; \quad Q_{12} = 8,5 \cdot 10^5.$$

Вычисления показали, что при определении амплитуды колебаний пятой массы при частоте импульсов 80 Гц и частоте собственных колебаний 70 Гц её максимальное значение достигается после пятого импульса (0,034 мм). Это хорошо согласуется с экспериментальным значением 0,04 мм, но характер колебаний не соответствует зарегистрированному на натурной машине.

Таким образом, система колеблется в режиме резонанса при затухании, близком к критическому, так как почти вся энергия движущихся масс периодически переходит в неупругую деформацию бумаги и также периодически восполняется от привода батареи по ранее рассмотренной схеме.

Поэтому становится очевидным, что амплитуду колебаний следует определять по максимальному перемещению после действия одиночного импульса, так как перемещения от предыдущих импульсов близки к нулю.

Если в каждый захват впадины приходят одновременно, то получим следующие значения амплитуд (мм):

$$A_6 = 0,06; \quad A_5 = 0,044; \quad A_4 = 0,022; \quad A_3 = 0,0012; \quad A_2 = 0,016; \quad A_1 = 0,028.$$

В случае разных фаз необходимо использовать известный метод наложения.

Влияние жесткости валов

Влияние жесткости валов на амплитуды их колебаний показаны в относительных единицах, где за единицу принята жесткость нижнего вала батареи. Для наглядности вместо жесткостей приведены относительные диаметры валов.

Таблица 1

Амплитуды и фазы колебаний при относительных диаметрах валов

Относительные диаметры	Амплитуды и фазы колебаний, мм					
	A ₆	A ₅	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁
0,29	- 0,016	- 0,054	- 0,035	- 0,014	+0,007	+0,022
0,43	- 0,017	- 0,055	- 0,036	- 0,013	+0,008	+0,023
0,57	- 0,020	- 0,056	- 0,037	- 0,013	+0,009	+0,024
0,71	- 0,028	- 0,061	- 0,038	- 0,012	+0,012	+0,029
0,86	- 0,054	- 0,078	- 0,044	- 0,007	+0,024	+0,044
1,0	- 0,486	- 0,035	- 0,014	+0,063	+0,214	+0,287
1,14	+0,085	+0,013	- 0,013	- 0,030	- 0,040	- 0,038
1,29	+0,045	- 0,014	- 0,022	- 0,024	- 0,021	- 0,014
1,43	+0,034	- 0,021	- 0,024	- 0,022	- 0,016	- 0,008
1,57	+0,029	- 0,024	- 0,025	- 0,021	- 0,014	- 0,005

Экспериментальные исследования

Проводился анализ воздушного шума каландровых батарей с помощью шумомера и анализатора спектра. Анализ шума на разных машинах, но с приблизительно одинаковыми параметрами, показал полную идентичность спектров частот. Кроме того, выяснено, что без бумаги в батарее её частотный спектр существенно отличается – исчезают, имеющие высокий уровень, колебания на частоте около 100 Гц.

Результаты, полученные при записи с микрофона, подтвердились измерениями с помощью датчиков разного типа, которые вводились в непосредственный контакт с поверхностями валов. Для определения амплитуд колебаний вращающихся валов сконструирован специальный датчик, установленный в массивный корпус, подвешенный на мягкой пружине так, что частота его собственных колебаний была на порядок ниже измеряемых частот. Использование одновременно шести датчиков позволило определить амплитуды, частоты и фазы колебаний как по длине каждого вала, так и на разных валах. Это позволило определить формы колебаний каждого вала и формы колебаний каландровой батареи как связанной системы валов. Колебания всех неподвижных элементов проводились с помощью стандартной виброизмерительной аппаратуры после градуировки на вибростенде.

Для оценки неравномерного износа использовалось открытие А.В. Верховского – «явление предварительных смещений», которое заключается в том, что относительный сдвиг двух твёрдых тел происходит при любой тангенциальной силе, меньшей силы трения. Величина полного смещения пропорциональна величине тангенциальной силы и состоит из упругого и остаточного смещений. На специально сконструированной установке определялись эти смещения для пары сталь – бумага при различных нормальных и тангенциальных нагрузках, соответствующих условиям в разных захватах каландровой батареи. Относительный износ оценивался по произведению скорости скольжения и амплитуды переменного давления в захвате, отнесённых к их сумме во всех захватах батареи.

Выводы

1. Установлен механизм возбуждения колебаний в каландровой батарее. Источником возмущения является верхний вал батареи, находящийся в условиях автоколебаний.
2. Проанализированы колебания при разных условиях закрепления концов валов – шарнирные опоры и свободные концы. Условия закрепления концов валов практически не влияют на амплитуды изгибных колебаний.
3. Определены частоты и формы свободных колебаний каландровой батареи.
4. Рассчитаны амплитуды колебаний системы при возмущениях импульсного характера, создаваемых впадинами на бумажном полотне, проходящими через захваты батареи.
5. Оценено влияние жесткости валов на амплитуды их вынужденных колебаний.
6. Экспериментально обнаружено, что все валы батареи колеблются по второму тону в вертикальной плоскости.
7. Без бумаги в батарее периодические колебания отсутствуют.
8. Амплитуды колебаний в вертикальной плоскости на порядок выше, чем в горизонтальной.
9. Амплитуда колебаний зависит от места, занимаемого валом в батарее.
10. Кроме изгибных колебаний, имеют место колебания валов как твёрдых тел.
11. Теоретическая оценка неравномерного износа поверхностей валов батареи вследствие вибрации хорошо согласуется с практической частотой смены изношенных валов.

Библиографический список

1. Ден Гартог, Дж.П. Механические колебания / Дж.П. Ден Гартог. – М.: Физматгиз, 1960.
2. Диментберг, Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов / Ф.М. Диментберг. – М.: АН СССР, 1959.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2016*

V.F. Baleyev

RESEARCH OF CALENDER ROLL SETS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev

Purpose: Theoretical and experimental research of sheet battery as the oscillating system. Determination of source of excitation of oscillations. Evaluation of uneven wear of the surfaces of system rolls at a variable pressure and the relative velocities of neighboring (adjacent) shafts.

Method: The creation of a theoretical model of the system rolls as an oscillating system. Determination of vibration parameters from a pulse loads. Theoretical estimate of uneven wear. The theoretical conclusions are confirmed by experimental values.

Research/implications: The parameters of oscillation are confirmed by experimental values on theoretical model. Calender roll sets are self-oscillating system that converts the energy from the drive. The reduction of the amplitudes of the oscillations of the shafts and intensity of uneven wear of their surfaces achieve by weakening the feedback.

Value: Researcher has committed the theoretical estimate calender roll sets as oscillation system. The theoretical values of the relative uneven wear consistent with experimental values.

Key words: forced oscillations, self-sustained oscillations, pulse loads.