

УДК 621.86.078.62

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА
СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОГО
ВАЛА ПРИВОДА ЛЕБЁДКИ ГРУЗОВОГО
ЛИФТА**

Шевелев М. В., Партко С. А., Дьяченко А. Г.

Донской государственной технической
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

shevelevmax95@mail.ruparlana@rambler.rudjatchenko.ag@yandex.ru

При проектировании узлов и несущих конструкций современного технологического оборудования разработчик нередко проводит расчеты статически неопределимых систем. Особенностью таких систем является то, что для прочностного расчета составления и решения одних уравнений статики недостаточно.

Проведен анализ имеющихся методик расчётов статически неопределённых систем, Выбран наиболее рациональный способ проектировочного расчета статически неопределимого вала привода лебёдки грузового лифта.

Ключевые слова: статически неопределимая система, метод сил, «лишние» связи, прочностной расчет.

Введение. Статически неопределимой называется такая система, которая не может быть рассчитана при помощи одних только уравнений статики. Такая система характеризуется «лишними» связями. Один из способов решения таких систем предполагает составление дополнительных уравнений, учитывающих деформации в системе.

Существует несколько аналитических методов расчета статически неопределимых систем: метод сил; метод перемещений; смешанный метод; комбинированный метод [1–3]. В методе сил в качестве неизвестных рассматриваются силы и моменты. В методе перемещений неизвестными являются деформационные факторы — углы поворотов и линейные смещения. В смешанном методе часть неизвестных — силы и моменты, а другая часть — перемещения. Комбинированный метод используется при расчете симметричных систем на несимметричные нагрузки. При расчете особо сложных систем используются различные численные методы.

Основная часть. Выходной вал привода лебедки грузового лифта (рис. 1), в отличие от статически определимых систем [4–7], является статически неопределимым, так как располагается на трех опорах. Для расчета вала применялся метод сил [3].

UDC 621.86.078.62

**CALCULATION FEATURES OF
STATICALLY INDETERMINATE DRIVE
SHAFT OF CARGO ELEVATOR WINCH**

Shevelev M. V., Partko S.A., Dyachenko A. G.

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

shevelevmax95@mail.ruparlana@rambler.rudjatchenko.ag@yandex.ru

When designing units and load-bearing structures of modern technological equipment, the developer often makes calculations of statically indeterminate systems. A feature of such systems is that generation and solutions to some equations of statics are not sufficient for strength calculation.

The analysis of available methods of calculation of statistically uncertain systems is carried out, the most rational method of design calculation of statically indeterminate drive shaft of the cargo elevator winch is chosen.

Keywords: statically indeterminate system, force method, "extra" connections, strength calculation.

Расчёты проводились при следующих заданных параметрах исходной системы вала (табл. 1). Данные были получены предварительным расчетом червячной передачи в CAD/CAE APM WinMachine [8]

Таблица 1

Расчетные параметры вала

Геометрические линейные параметры вала (рис. 2)		Параметры червячного колеса		Канатоведущий шкив и силы натяжения ветвей каната	
		геометрические	силовые	геометрические	силовые
a	80 мм	$d_w = 271$ мм	$F_{t2} = 11530$ Н $F_{r2} = 4147$ Н $F_{x2} = 2089$ Н	$D_{шк} = 500$ мм	$S_1 = 20964$ Н
b	85 мм			$\alpha \approx 30^\circ$	$S_2 = 14715$ Н
c	83 мм				
d	96 мм				

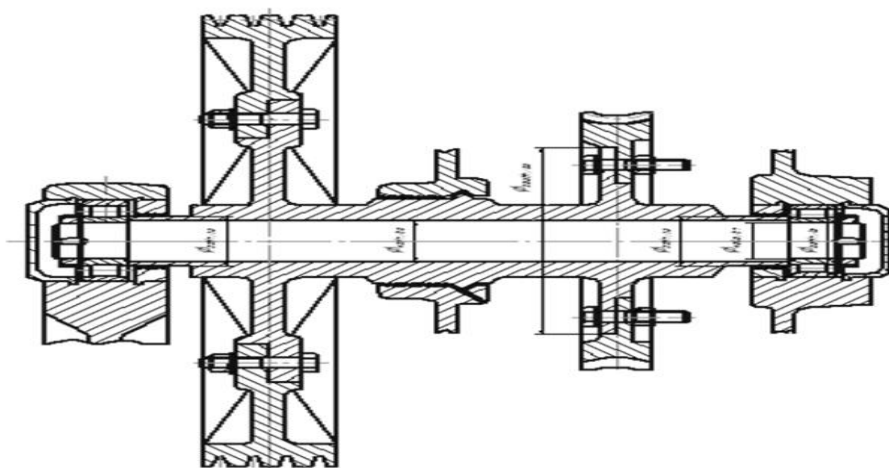


Рис. 1. Выходной вал привода

Этот вал обладает рядом характерных особенностей:

1. Выходной вал привода лебедки грузового лифта, ввиду предъявляемым повышенным требованиям к жесткости и прочности, является более жестким, чем соответствующий статически определимый двухопорный вал, так как имеет дополнительные связи.

2. На трехопорном валу возникают меньшие внутренние усилия, что определяет его повышенный ресурс, по сравнению со статически определимыми двухопорными валами, при одинаковых внешних нагрузках.

3. Нарушение лишних связей на статически неопределимом трехопорном валу не приведёт к разрушению конструкции, что является необходимым условием надежности для деталей приводов лифтов.

4. Для расчета статически неопределимого вала необходимо заранее выбрать материал конструкции и задаться геометрическими характеристиками поперечных сечений, т.е. фактически его формой и размерами, так как их изменение приводит к изменению жесткости и, значит, усилий в связях, что по-новому распределяет усилия во всех элементах системы.

Для проведения расчета примем следующие допущения:

- вал имеет постоянную жесткость по всей длине;
- опоры предполагаются самоустанавливающимися допускающими свободные угловые перемещения вала.

Для построения основной системы методом сил были отброшены лишние связи — опора А, (рис. 2), а их действие заменено неизвестными реакциями X_1 и X_2 .

Далее общая задача сводилась к определению реакций в горизонтальной плоскости xy и вертикальной плоскости xz .

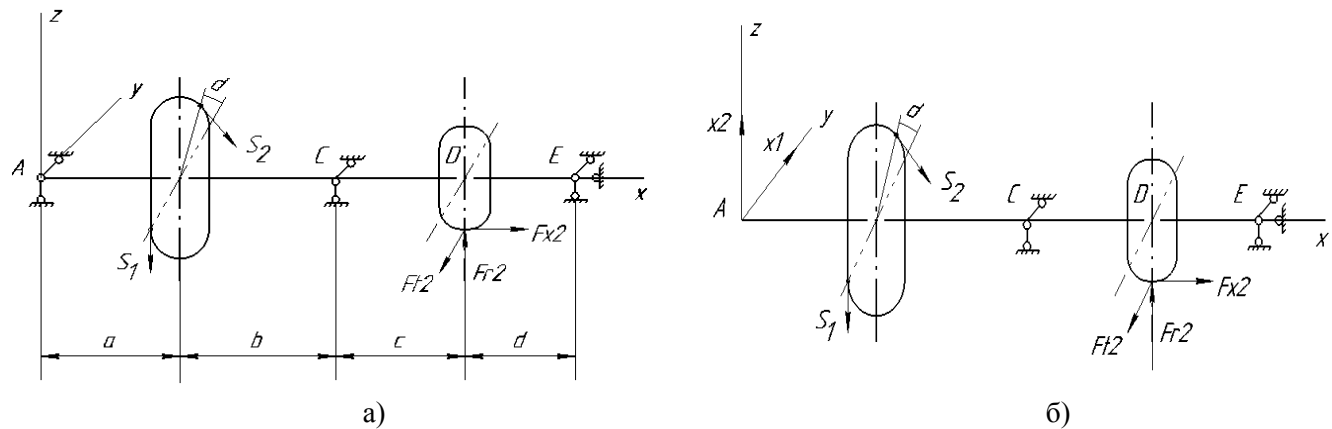


Рис. 2. Расчетные схемы выходного вала привода лебедки:
 а) исходная статически неопределимая система;
 б) преобразованная статически определимая система

Для преобразованной системы вала (рис. 2 а) канонические уравнения в горизонтальной и вертикальной плоскости имеют следующий вид:

$$\delta_{11} \cdot X_1 + \Delta_{1F} = 0; \tag{1}$$

$$\delta_{22} \cdot X_2 + \Delta_{2F} = 0, \tag{2}$$

где: δ_{11}, δ_{22} — единичные перемещения по направлению i -ой связи; X_1, X_2 — неизвестные реакции k -ой связи; Δ_{1F}, Δ_{2F} — линейные перемещения по направлению i -ой связи.

Для канонических уравнений (1) и (2) метода сил единичные и линейные перемещения запишутся в виде следующих выражений:

$$\delta_{11} = \int_l \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_1}{E \cdot y} dx = \frac{1}{E \cdot y} (w_1 \cdot h_1 + w_2 \cdot h_2 + w_3 \cdot h_3 + w_4 \cdot h_4)$$

$$\Delta_{1F} = \int_l \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_F}{E \cdot y} dx = \frac{1}{E \cdot y} (w_1 \cdot h_1 + w_2 \cdot h_2 + w_3 \cdot h_3 + w_4 \cdot h_4)$$

$$\delta_{22} = \int_l \frac{\bar{M}_2 \cdot \bar{M}_2}{E \cdot y} dx = \frac{1}{E \cdot y} (w_1 \cdot h_1 + w_2 \cdot h_2),$$

$$\Delta_{2F} = \int_l \frac{\bar{M}_2 \cdot \bar{M}_F}{E \cdot y} dx = \frac{1}{E \cdot y} (w_1 \cdot h_1 + w_2 \cdot h_2 + w_3 \cdot h_3 + w_4 \cdot h_4)$$

где:

\bar{M}_1, \bar{M}_2 — единичные изгибающие моменты;

\bar{M}_F — грузовой изгибающий момент;

$w_1 \dots w_i$ — площади соответствующих участков эпюры грузовых моментов (m^2);

$h_1 \dots h_4$ — соответствующие ординаты с эпюры единичных изгибающих моментов, (м);

$E \cdot y$ — жёсткость по длине вала, (МПа·м), $E \cdot y = const$;

Исходя из равенства моментов сил и реакций в горизонтальной плоскости относительно опоры «С», составим следующее уравнение:

$$\sum M_c = 0;$$

$$Y_{EF}(c+d) - F_{r2} \cdot c - S_2 \cdot \sin \alpha \cdot b = 0$$

Выразим и определим реакцию Y_{EF} :

$$Y_{EF} = \frac{1}{c+d} (F_{r2} \cdot c + S_2 \cdot \sin \alpha \cdot b) = \frac{1}{179} \cdot (11530 \cdot 83 + 14715 \cdot \sin 30^\circ \cdot 80) = 8840H$$

Исходя из равенства моментов сил и реакций относительно опоры «Е», составим следующее уравнение:

$$\sum M_E = 0$$

$$-Y_{CF}(c+d) + F_{r2} \cdot d - S_2 \cdot \sin \alpha \cdot (b+c+d) = 0;$$

Выразим и определим реакцию Y_{CF} :

$$Y_{CF} = \frac{1}{c+d} [F_{r2} \cdot d - S_2 \cdot \sin \alpha \cdot (b+c+d)] = \frac{1}{179} \cdot (11530 \cdot 96 - 14715 \cdot \sin 30^\circ \cdot 264) = -4668H$$

Проверка:

$$\sum Y = Y_{CF} + Y_{EF} + S_2 \cdot \sin \alpha - F_{r2} = -4668 + 8840 + 14715 \cdot \sin 30^\circ - 11530 = 16198 - 16198 = 0$$

Выполнена. Значит реакции определены верно.

Исходя из равенства моментов сил и реакций в вертикальной плоскости относительно опоры «С», составим следующее уравнение:

$$M_c = 0;$$

$$Z_{EF} \cdot (c+d) + F_{r2} \cdot c + \frac{F_{x2} \cdot dw_2}{2} + S \cdot b = 0$$

Выразим и определим реакцию Z_{EF} :

$$Z_{EF} = -\frac{1}{c+d} (F_{r2} \cdot c + \frac{F_{x2} \cdot dw_2}{2} + (S_1 + S_2 \cdot \cos \alpha) \cdot b) = -\frac{1}{179} (4147 \cdot 83 + 283060 + (20964 + 14715 \cdot \cos 30^\circ) \cdot 85) = -19511H$$

Проверка:

$$\sum Z = Z_{CF} + Z_{EF} + F_{r2} - S = 49072 - 19511 + 4147 - 33708 = 53219 - 53219 = 0$$

Выполнена. Значит реакции определены верно.

Исходя из равенства моментов сил и реакций в вертикальной плоскости относительно опоры «Е», составим следующее уравнение:

$$M_E = 0;$$

$$Z_{CF} \cdot (c+d) - F_{r2} \cdot d + \frac{F_{x2} \cdot d_{w2}}{2} + S \cdot (b+c+d) = 0$$

Выразим и определим реакцию Z_{CF} :

$$Z_{CF} = \frac{1}{c+d} (F_{r2} \cdot d - \frac{F_{x2} \cdot d_{w2}}{2} - (S_1 + S_2 \cdot \cos \alpha) \cdot (b+c+d)) = \frac{1}{179} (4147 \cdot 96 - 283060 + (20964 + 14715 \cdot \cos 30^\circ) \cdot (85 + 83 + 96)) = 49072H$$

Проверка:

$$\sum Z = Z_{CF} + Z_{EF} + F_{r2} - S = 49072 - 19511 + 4147 - 33708 = 53219 - 53219 = 0$$

определены верно.

Расчет коэффициента запаса прочности с использованием модуля «Shaft» CAD/CAE APM WinMachine показал, что минимальный коэффициент запаса будет равен 4,7 (рис. 3).

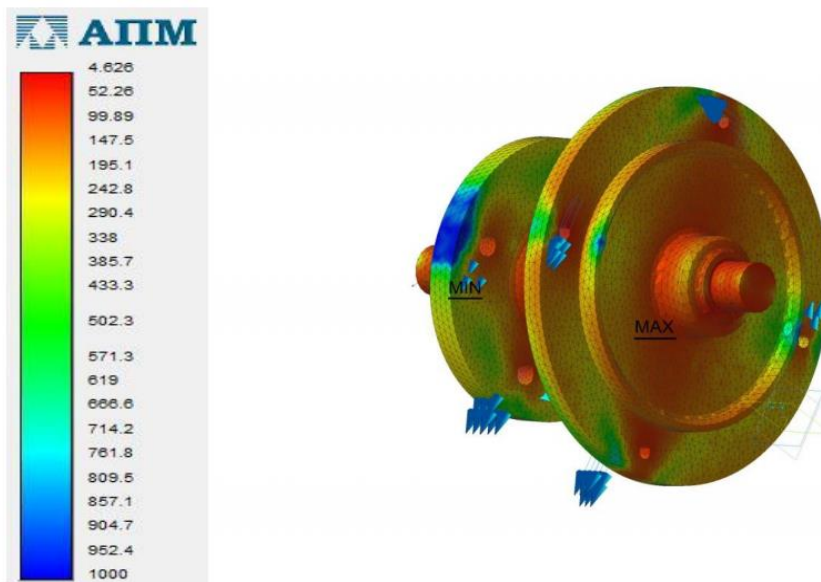


Рис. 3. Результат расчета вала методом конечных элементов с использованием модуля «Shaft» CAD/CAE APM WinMachine

Для подтверждения результатов расчета коэффициента запаса прочности необходимо провести дальнейший расчет уравнений (1), (2) и определить приведенные моменты в опасных сечениях вала.

Заключение. Предварительный расчет реакций с использованием CAD/CAE APM WinMachine показал хорошую сходимость с практическими результатами, что позволяет перейти к следующему этапу проектировочных расчетов в которых будут определены коэффициенты канонических уравнений δ_{11} и δ_{22} , силы X_1 и X_2 . В свою очередь, это позволит определить изгибающие моменты в горизонтальной и вертикальной плоскости и построить эпюры суммарных изгибающих моментов.

Библиографический список

1. Демин, О. В., Сопротивление материалов: учеб. пособие / О. В. Демин, В. Е. Буланов, А. Н. Гузачев. — Тамбов : Издательство ТГТУ. — 2006/ — 84 с.
2. Моисеенко, Р. П. Лекции по сопротивлению материалов. Ч. 1 : учеб. пособие / Р.П. Моисеенко; под ред. В.Н. Барашкова. — Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. — 136 с.
3. Сурьянинов, Н. Г. Методы построения эпюр в статически определимых и статически неопределимых системах [Электронный ресурс]/ Н. Г. Сурьянинов. — 2009. — 155с. — Режим доступа : http://pnu.edu.ru/media/filer_public/2013/04/10/3-11_suryaninov_2001.pdf (дата обращения : 22.04.2018).
4. Грошев, Л. М. Повышение работоспособности бортового редуктора комбайна серии «Дон» / Л. М. Грошев, С. А. Партко, А. Г. Дьяченко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. статей 7-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 17-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2014». — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 89–90.

5. Сиротенко, А. Н. Энергосберегающий пневмопривод технологического оборудования / А. Н. Сиротенко, С. А. Партко // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: сб. статей VI науч.-практ. конф. «Интерагромаш-2014». — Ростов-на-Дону, 2014. — С. 173–177.

6. Сиротенко, А. Н. Рекуперация энергии в пневмоприводе фасовочно-наполнительного оборудования / А. Н. Сиротенко, А. Г. Дьяченко, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей VI междунар. науч.-практ. конф. «Интерагромаш-2013». — Ростов-на-Дону, 2013. — С. 69–71.

7. Сиротенко, А. Н. Особенности расчета валов цилиндрического редуктора в CAD/CAE APM Winmachine/ А. Н. Сиротенко / Инновационные технологии науке и образовании. ИТНО-2015 : сб. науч. тр. науч. метод. конф., посвящ. 85-летию ДГТУ. — Ростов-на-Дону : Зерноград, 2015. — С. 20–24.

8. Партко С.А. Особенности расчета червячной передачи в CAD/CAE APM Winmachine и «Компас»/С.А. Партко/ Инновационные технологии науке и образовании. ИТНО-2015: сб. науч. тр. науч. метод. конф., посвящ. 85-летию ДГТУ/ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии. – Ростов н/Д; Зерноград, 2015. – С.132-137.