УДК 666.97.033.16

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АСИММЕТРИЧНОЙ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛЫ ВИБРОПОГРУЖАТЕЛЕЙ

Герасимов М.Д., Степанищев В.А.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», Белгород, e-mail: mail mihail@mail.ru

В статье приведены теоретические и аналитические исследования по вопросу получения асимметричной вынуждающей силы погружения и подъёма для вибропогружателей свай. Способ включает получение результирующей асимметричной вертикальной вынуждающей силы, составляющие которой генерируют с помощью п элементарных вибровозбудителей направленного действия. Предложен закон и метод описания режима генерирования вынужденных колебаний системы. Приведен сравнительный расчёт поведения системы состоящей из семи и из пяти элементарных вибровозбудителей. Получение заранее заданной вдавливающей силы решается посредством числа гармоник при соответствующем подборе статических моментов. При увеличении числа элементарных вибровозбудителей сокращается время действия вдавливающей силы на погружаемый элемент (сваю). Из закона сохранения количества движения следует, что чем меньше время воздействия, тем больше время действия подъёмной силы, тем меньше значение подъёмной силы, т.е. уменьшение времени воздействия позволяет получить меньшую подъёмную силу.

Ключевые слова: вибропогружатель, вынуждающая сила, коэффициент асимметрии, закон изменения вынуждающей силы

THEORETICAL STUDIES OBTAINING ASYMMETRIC DRIVING FORCE FOR VIBRATOR MODELS

Gerasimov M.D., Stepanischev V.A.

Belgorod state technological university after V.G. Shukhov, Belgorod, email: mail mihail@mail.ru

The article describes theoretical and analytical studies on the issue of asymmetric driving force of a immersing and lifting for vibration exciters. The method includes receiving the resulting asymmetric vertical driving force, which components are generated by using n elementary directional vibration exciters. Proposed the law and the method of mode generation of forced vibrations of a system. Describes the comparative calculation of the behavior of the system which consists of seven and five elementary vibration exciters. Obtaining predetermined driving force of a immersing is achieved through a number of harmonics with a suitable choice of static moments. If you increase the number of elementary vibration exciters, time is reduced actions of immersing force on the dip-element (pile). From the law of conservation of momentum, it follows that the less the exposure time, then action's time of the hoisting forces is more, but then less value of the lifting force, i.e. reduction of the exposure time, lets get less elevating force.

Keywords: vibrator model, driving, coefficient of asymmetry, the law of changing the driving force

Операции забивки и извлечения свайных элементов занимают важное место в строительстве. Существует несколько способов погружения свай: ударный, вибрационный, статический, завинчиванием. Требования к темпам и качеству производства свайных работ диктуются не только проектными нормами, но и экономическими, экологическими и социальными аспектами.

В конструкцию современных вибропогружателей включают вибровозбудительную коробку с двумя, четырьмя или шестью вибрационными валами, захватывающий элемент, пригруз, амортизаторы.

Вибрационные валы при вращении посредством дебалансов создают циклическую вынуждающую силу. Составляющая вынуждающей силы, направленная вниз, носит название — погружающая, вдавливающая $(F_{\rm B})$, а направленная вверх — подъёмная $(F_{\rm B})$.

Большинство вибропогружателей выпускаются с симметричной вынуждающей силой. Применение симметричной $F_{_{\rm II}} = F_{_{\rm B}}$ вынуждающей силы ведёт к использованию пригруза. Пригруз частично или полностью

компенсирует подъёмную силу и обеспечивает погружение сваи.

Одним из направлений совершенствования вибропогружателя является применение асимметричной вынуждающей силы. В этом случае происходит изменение соотношения подъемной и вдавливающей силы, т.е. $F_{\rm II} < F_{\rm II}$. Применение асимметричной вынуждающей силы может повысить эффективность работы вибропогружателя при снижении металлоемкости.

Можно заключить, что влияние характера вынуждающей силы на эффективность погружения свайных элементов в настоящее время не может считаться до конца изученным вопросом.

Отношение значения вдавливающей силы $F_{\scriptscriptstyle \rm B}$ к подъёмной $F_{\scriptscriptstyle \rm I}$ носит название: коэффициент асимметрии. Коэффициент асимметрии может изменяться в широком диапазоне.

В соответствии с основными направлениями развития машин для свайных работ [5] в настоящей статье рассматривается одно из перспективных направлений

развития способа вибропогружения свай и устройства для его осуществления.

Paнее выполненные работы [2, 3, 4, 6, 8, 9 позволяют продолжить исследования по повышению эффективности работы вибропогружателей.

Задачей исследований является создание средств вибровозбуждения, позволяющих получать высокий коэффициент силовой асимметрии при меньшем количестве элементарных вибровозбудителей за счёт улучшения закона изменения результирующей вынуждающей силы.

Существуют технические решения [7], содержащие универсальное вдавливающее устройство. Этот дебалансный вибровозбудитель направленного действия позволяет обеспечить в плавном (безударном) режиме погружение свай в грунт при семикратной асимметрии вынуждающей силы.

Недостатком такого и аналогичного [11] технического решения является невозможность получения высоких значений коэффициента асимметрии вынуждающей силы при уменьшении количества элементарных

вибровозбудителей направленного

В данной работе рассматривается способ получения асимметричных механических колебаний направленного действия.

Способ включает получение результирующей асимметричной вертикальной вынуждающей силы, составляющие которой генерируют с помощью п элементарных вибровозбудителей направленного действия.

Кратность отношений угловых скоростей вращения валов элементарных вибровозбудителей к угловой скорости первого вала соответствует числам натурального ряда от 1 до n.

Статический момент элементарных вибровозбудителей уменьшается с увеличением угловой скорости ω_i .

Режим генерирования составляющих F_i возбуждающей силы F осуществляют по закону её изменения, определяемой зависимостью

$$F = F(t) = A \cos^{2p} \omega t/2, \tag{1}$$

разложение которой в ряд Фурье содержит

$$F_{(p-k)} = A \cdot [2^{2p-1}]^{-1} (2p)! [k! \cdot (2p-k)!]^{-1} \cos(p-k) \cdot \omega_{(p-k)} t, \tag{2}$$

где k = 0, 1, 2, ..., (p-1); 2p — порядок зависимости F(t); p – порядок наивысшей гармоники; A — амплитуда изменения вынуждающей силы.

Зависимость (2) получена следующим образом.

Элементарные вибровозбудители 2, представляют собой двухдебалансные создающие направленные вибраторы, силы инерции, изменяемые по гармоничному закону, представляют (с учётом кинематической связи их валов с передаточными отношениями зубчатых колёс в виде ряда натуральных чисел) гармоники ряда Фурье.

Для четной функции f(x) ряд Фурье [1] имеет вид

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{p=1}^{\infty} a_p \cos px,$$
 (3)

где коэффициенты Фурье

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) dx;$$
 (4)

 $f^*(x) = \frac{a_0}{2} = \frac{A}{\pi} \int_0^{\pi} \cos^{2p} \frac{x}{2} dx = \frac{A(2p)!}{2^{2p}(p!)^2}.$ (6a)

до k = p - 1) в виде

$$A\cos^{2p}\frac{x}{2} = \frac{A(2p)!}{2^{2p}(p!)^2} + \frac{A}{2^{2p-1}}\sum_{k=0}^{p-1} 2p!(k!)^{-1} [(2p-k)!]^{-1}\cos(p-k)x.$$
 (8)

С учётом физической сущности процесса переменную x можно представить как ωt , где ω – угловая скорость (угловая частота) вращения вала, t – время в пределах периода T, при этом в зависимости (8) меняется вид последнего сомножителя (х заменяется

гармоники (p - k) порядка

$$a_p = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cos px dx.$$
 (5)

Из зависимости (3) получаем

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} f(x) dx = f^*(x), \tag{6}$$

где $f^*(x)$ – среднее арифметическое функции f(x) на отрезке $[0, \pi]$.

В качестве базовой функции для представления закона изменения вынуждающей силы для дебалансного вибровозбудителя направленного действия мультипликационного типа можно принять на интервале - $\pi \le x \le \pi$ функцию

$$f(x) = A \cos^{2p} x/2, \tag{7}$$

и которая может быть представлена конечным рядом из переменных членов (от
$$k=0$$

на ωt , а в гармониках $A_i \cos i\omega t$ ряда Фурье A_i соответствуют силе F_i , генерируемой i-м вибровозбудителем.

Второе слагаемое зависимости (8) представляет сумму гармоник и после замены х на ωt каждая из них может быть представлена зависимостью (2).

С помощью зависимости (8) можно количественно оценить эффективность вибровозбуждения. Принимаем количество элементарных вибровозбудителей n = p = 7.

После преобразования и подстановки p = 7 во второе слагаемое зависимость (8) для вынуждающей силы $F_{(7)}$ имеем

$$F_{(7)} = A\cos^{2p} - Aa_0/2 = A \left[\frac{1}{8192} \left(3003 \cos x + 2002 \cos 2x + 1001 \cos 3x + 364 \cos 4x + 91 \cos 5x + 14 \cos 6x + \cos 7x \right].$$
 (8a)

По зависимости (8а) получаем следующие соотношения, пропорциональные генерируемыми і-ми вибровозбудителями

$$A_1/A = 3003/8192, A_2/A = 2002/8192, A_3/A = 1001/8192, A_4/A = 364/8192,$$

 $A_5/A = 91/8192, A_6/A = 14/8192, A_7/A = 1/8192.$ (86)

а при $x = \pi/2$

Так как шестым и седьмым соотношениями амплитуд из ряда (8б) из-за незначительного их размера можно пренебречь, то практически достигается тот же силовой эффект и при пяти вибровозбудителях при законе изменения вынуждающей силы $F = \cos^{2p} x/2.$

Из зависимости (2) с учётом конечности ряда при x = 0 имеем

$$\sum_{k=0}^{p} a_{p} = f(0) - \frac{a_{0}}{2} = F_{\text{B}}, \tag{9}$$

$$k_{_{\Pi}} = |F_{_{B}}/F_{_{\Pi}}| = [f(0) - f^{*}(x)]/f^{*}(x) = k_{_{a}}, \tag{11}$$

т.е. коэффициенты динамичности системы и асимметрии вынуждающей силы совпадают, а параметры $F_{_{\rm B}}$ и $F_{_{\rm H}}$ являются соответственно модулями вдавливающей и подъёмной вынуждающей силы F.

Амплитуда или общая сила

$$A = |A_{\scriptscriptstyle 6}| + |A_{\scriptscriptstyle n}| \tag{12}$$

где A_{n} и A_{n} – амплитуды вдавливающей силы й подъёмной силы соответственно.

Подъёмная сила

$$F_n = G_{\scriptscriptstyle g} + G_{\scriptscriptstyle c} - A_{\scriptscriptstyle n}, \tag{13}$$

где G_{p} и G_{p} – вес вибровозбудителя и вес сваи (естественный пригруз) соответственно, а их сумма является статической нагрузкой.

Получение заранее заданной вдавливающей силы $F_{_{\rm B}}$ решается посредством числа гармоник при соответствующем подборе статических моментов. При увеличении числа элементарных вибровозбудителей сокращается время действия вдавливающей силы F на погружаемый элемент (сваю). Из закона сохранения количества движения следует, что чем меньше время воздействия $F_{\rm p}$, тем больше время действия подъёмной силы $F_{\rm n}$, тем меньше значение подъёмной силы $F_{\rm n}$, т.е. уменьшение времени воздействия $F_{\rm n}$ позволяет получить меньшую подъёмную силу F_{Π} .

силам \overline{F} :

 $\sum_{k=0}^{p} (-1)^{p} a_{p} = f\left(\frac{\pi}{2}\right) - \frac{a_{0}}{2} = -F_{\pi}. \quad (10)$

Параметры F_a и F_a обеспечивают оценку точности приближения ряда Фурье к функции f(x) при конечном числе членов ряда, меньшем p.

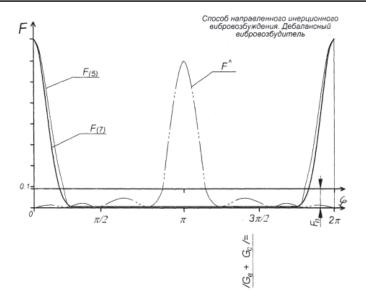
Для монотонно убывающей функции f(x) вибрационная система может быть оценена коэффициентом динамичности

Задавшись коэффициентом динамичности (силовой асимметрии) $k_{_{\rm I}}=k_{_{\rm I}}=8$ с учётом статической нагрузки $(G_{_{\rm B}}+G_{_{\rm C}}=F_{_{\rm I}})$, строим два графика вынуждающей силы $F_{_{\rm (7)}}$ и $\bar{F}_{(5)}$ (соответственно при 7 и 5 элементарных вибровозбудителях) за период T оборота вала первого вибровозбудителя (от 0 до 2π) со сдвигом по оси ординат на размер статической нагрузки (рисунок). Также наносим график вынуждающей силы F прототипа (при 7 элементарных вибровозбудителях и $k_{\pi} = k_{a} = 7$).

Из графика изменения вынуждающей предлагаемого вибровозбудителя видно, что при большем коэффициенте динамичности (силовой асимметрии) и равном или меньшем количестве элементарных вибровозбудителей в сравнении с прототипом функция более гладкая (без колебаний).

Вывод

Теоретические и аналитические исследования полигармонических вибровозбудителей направленного действия показывают, что технически возможно получение необходимых по асимметрии вынуждающих сил при наименьшем количестве элементарных вибровозбудителей.



Изменение вынуждающей силы предлагаемого вибропогружателя с пятью и с семью элементарными вибровозбудителями аналога с семью элементарными вибровозбудителями

Список литературы

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. — М.: Наука, 1981.-C.550.

2. Вибрационные погружатели для свайных работ: сб. патентной документации по кл. МПК7 С1: учебн. пособ. для студентов механ. специальностей и подготовки бакалавров; под общ. ред. М.Д. Герасимова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2013, – 52 с.

3. Герасимов М.Д., Алиматов Б.А., Герасимов Д.М., Чеботарев О.И. Направление совершенствования вибраторов направленного действия // Научно-технический журнал Фер. ПИ. – 2013. – № 3. – С. 23–26.

4. Герасимов М.Д., Алиматов Б.А., Герасимов Д.М., Чеботарев О.И. Теоретические и экспериментальные исследования вибрационных параметров генератора направленных колебаний планетарного типа // Научно-технический журнал Фер. ПИ. – 2013. – № 4. – С. 17–20.

5. Жулай В.А. Машины для свайных работ. Конструкции и расчеты: учеб. пособие, Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2011. – 216 с

6. Исаев И.К., Герасимов М.Л. О потере кинетической энергии при ударе // Исследования и инновации ВУЗе: меж-

дунар. научн.-технич. конференция молодых учёных: сб. докл. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – Ч.2. – 751 с. 7. Патент РФ 2009106429/03, 24.02.2009, Ермоленко В.Н., Насонов И.В., Суровцев И.С. Универсальное вдавливающее устройство. Патент России № 238868. 2010. Бюл. № 13

8. Степанищев В.А. Способ получения асимметричных механических колебаний направленного действия // Ломоносов 2013: материалы Международного научного форума; отв. ред. А.И. Андреев, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, М.В. Чистякова. [Электронный ресурс] – М.; МАКС Пресс, 2013. – 1 электр. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Систем. Требования: ПК с процессором 486+; Windows 95; дисковод DVD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

9. Степанищев В.А., Герасимов М.Д. Исследование технических параметров номенклатурного ряда вибропогружателей фирмы MÜLLER // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений: сб. докладов Международ. науч.практ. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. – Т. II. – 328 с. 10. Patent US 7,804, 211 B2 VIBRATION GENERATOR.

11.03.2009. A. Kleibt, Ch. Heichel.

References

1. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchaschihsya vuzov. Moskva.: Nauka,1981. pp. 550.

2. Vibratsionnye pogruzhateli dlya svaynyh rabot: sb. patentnoy dokumentatsii po kl. MPK7 S1: uchebn. posob. dlya stu-

dentov mehan. spetsialnostey i podgotovki bakalavrov. Pod obsch. red. M.D. Gerasimova. Belgorod: Izd-vo BGTU, 2013, 52 p.

3. Gerasimov M.D., Alimatov B.A., Gerasimov D.M., Che-

5. Gerasimov M.D., Alimatov B.A., Gerasimov D.M., Chebotarev O.I. Napravlenie sovershenstvovaniya vibratorov napravlennogo deystviya // NAUCHNO-TEHNICHESKIY ZHURNAL Fer.Pl, 2013, no3, pp. 23–26.

4. Gerasimov M.D., Alimatov B.A., Gerasimov D.M., Chebotarev O.I. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya vibratsionnyh parametrov generatora napravlennyh kolebaniy planetarnogo tipa // NAUCHNO-TEHNICHESKIY ZHURNAL

Fer.Pl, 2013, no. 4, pp. 17–20. 5. Zhulay V.A. Mashiny dlya svaynyh rabot. Konstruktsii i raschety: ucheb. posobie, Voronezh. gos. arh.-stroit. un-t.- Voro-

nezh, 2011. 216 i

6. Isaev I.K., Gerasimov M.L. O potere kineticheskoy energii pri udare. Mezhdunar. nauchn.-tehnich. konferentsiya. Molodih uchonykh «Issledovaniya i innovatsii VUZe»: sb. dokl

Belgorod: Izd-vo BGTU, 2012. Ch.2. 751 p.
7. Patent RF 2009106429/03, 24.02.2009, Ermolenko V.N.,
Nasonov I.V., Surovtsev I.S. Universalnoe vdavlivayuschee ustroystvo. Patent Rossii no238868. 2010. Byul no. 13

8. Stepanischev V.A. Sposob polucheniya asimmetrichnyh mehanicheskih kolebaniy na-pravlennogo deystviya. Materialyi Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma «Lomonosov 2013» Otv. red. A.I. Andreev, A.V. Andriyanov, E.A. Antipov, M.V. Chistya-kova. [Elek-tronnyiy resurs] M.; MAKS Press, 2013. 1 elektr. opt. disk (DVD-ROM); 12 sm. Sistem. Trebovaniya: PK s protsessorom 486; Windows 95; diskovod DVD-ROM; Adobe Acrobat Reader. 9. Stepanischev V.A., Gerasimov M.D. Issledovanie teh-

nicheskih parametrov nomenklaturnogo ryada vibropogruzhateley firmy MÜLLER. Innovatsionnye materialy, tehnologii i oborudovanie dlya stroitelstva sovremennyh transportnyh sooruzheniy: sb. dokladov Medunarod. nauch.-prakt. konf. Belgorod: Izd-vo BGTU, 2013. T.II. 328 p.
10. Patent US 7,804,211 B2 VIBRATION GENERATOR.

11.03.2009. A. Kleibt, Ch. Heichel.

Рецензенты:

Богданов В.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Механическое оборудование», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород;

Севостьянов В.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технологические комплексы, машины и механизмы», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород.

Работа поступила в редакцию 18.03.2014.