НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ
январь–февраль 2026 Том 26 № 1 http://ntv.ifmo.ru/
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS
January–February 2026 Vol. 26 No 1 http://ntv.ifmo.ru/en/
ISSN 2226-1494 (print) ISSN 2500-0373 (online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-214-217
УДК 681.51.015

Оценка частоты гармонической несущей возмущенного амплитудно-модулированного сигнала

Алексей Алексеевич Бобцов[1], Ольга Владимировна Оськина[2]✉, Ольга Валерьевна Слита[3], Николай Анатольевич Николаев[4], Антон Александрович Бойцев[5]

[1,2,5] Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
[3,4] Технион — Израильский технологический институт, Хайфа, 3200003, Израиль

[1] bobtsov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717
[2] ov_oskina@itmo.ru✉, https://orcid.org/0009-0005-5121-0432
[3] o-slita@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7119-3629
[4] nikona@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8835-5142
[5] boitsevanton@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-3374-8256

Аннотация
В работе предложен новый алгоритм оценивания частоты несущей амплитудно-модулированного сигнала при наличии помех измерений. Выполнена оценка максимальной амплитуды возмущающего воздействия, при котором задача оценки неизвестной частоты может быть решена в рамках предлагаемого подхода. Задача оценки частоты решается в несколько этапов: параметризация исходного измеряемого сигнала к виду линейной регрессии; применение нелинейного преобразования координат исходной регрессионной модели; оценка неизвестной частоты. Результаты работы могут быть использованы при решении практических задач в областях обработки и оценивания параметров синусоидальных сигналов, подверженных влиянию возмущения.

Ключевые слова
синусоидальный сигнал, линейная регрессионная модель, идентификация параметров, возмущение

Ссылка для цитирования: Бобцов А.А., Оськина О.В., Слита О.В., Николаев Н.А., Бойцев А.А. Оценка частоты гармонической несущей возмущенного амплитудно-модулированного сигнала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 1. С. 214–217. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-214-217

Harmonic carrier frequency estimation of a disturbed amplitude modulated signal

Alexey A. Bobtsov[1], Olga V. Oskina[2]✉, Olga V. Slita[3], Nikolay A. Nikolaev[4], Anton A. Boitsev[5]

[1,2,5] ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
[3,4] Technion — Israel Institute of Technology, Haifa, 3200003, Israel

[1] bobtsov@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717
[2] ov_oskina@itmo.ru✉, https://orcid.org/0009-0005-5121-0432
[3] o-slita@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7119-3629
[4] nikona@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8835-5142
[5] boitsevanton@itmo.ru, https://orcid.org/0000-0002-3374-8256

Abstract
This paper proposes a new algorithm for estimating the carrier frequency of an amplitude modulated signal in the presence of measurement noise. An estimate is provided for the maximum amplitude of the disturbance for which the problem of estimating the unknown frequency can be solved using the proposed approach. The problem of frequency estimation is solved in several stages: parameterization of the initial measured signal to the form of linear regression; application of a nonlinear transformation of the coordinates of the initial regression model; estimation of the unknown frequency. The results of the paper can be used to solve practical problems in the areas of processing and evaluating sinusoidal signals subject to disturbances.

Keywords
sinusoidal signal, linear regression model, parameter identification, disturbance

For citation: Bobtsov A.A., Oskina O.V., Slita O.V., Nikolaev N.A., Boitsev A.A. Harmonic carrier frequency estimation of a disturbed amplitude modulated signal. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 1, pp. 214–217 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-214-217

Проблема оценки параметров синусоидальных и, в частности, амплитудно-модулированных сигналов является классической задачей для многих областей наук, включая теорию автоматического управления [1, 2]. В настоящее время предложено большое количество алгоритмов, обеспечивающих оценку неизвестной частоты, которые можно условно разделить на: спектральные (основанные на преобразовании Фурье); параметрические, которые используют математическую модель сигнала, где частота входит как неизвестный параметр (например, сведение исходной задачи к линейной регрессионной модели); адаптивные алгоритмы оценивания с использованием, например, градиентного алгоритма. В последние годы активно развиваются алгоритмы оценки параметров синусоидальных сигналов, параметры которых меняются во времени, что естественно включает и класс амплитудно-модулированных сигналов [3–5], где рассматриваются сигналы с изменяющейся во времени амплитудой и частотой. Наряду с проблемой синтеза алгоритмов оценки параметров незашумленных синусоидальных сигналов, важной задачей является проблема синтеза алгоритмов оценки для случаев, когда измеряемый синусоидальный сигнал подвержен влиянию возмущения/шума [6]. В настоящей работе рассматривается задача оценки постоянной частоты гармонической несущей измеряемого амплитудно-модулированного сигнала при воздействии неизвестного, ограниченного возмущающего воздействия.

Рассмотрим измеряемый синусоидальный сигнал вида

$$y(t) = A(t)\sin(\omega t + \varphi) + \delta(t), \tag{1}$$

где $A(t)$ — меняющаяся во времени амплитуда — модулирующий сигнал; ω — неизвестная частота; φ — фазовый сдвиг; $\delta(t)$ — ограниченное неизвестное возмущение.

Важно отметить, что для синусоидальных сигналов с меняющейся во времени амплитудой применение различных фильтров (включая линейные стационарные полосовые) не представляется возможным или требует дополнительных знаний о несущей частоте возмущений, а также модели изменения амплитуды $A(t)$. В любом случае авторы оставляют собой право так полагать, поскольку им не известны подходы фильтрации для параметрически нелинейных сигналов, подверженных влиянию внешнего возмущения.

В работе поставлена задача синтеза алгоритма идентификации параметра. Данная задача будет решена при выполнении следующих допущений.

Допущение 1. Модулирующий сигнал $A(t)$ предполагается гладкой, ограниченной и известной функцией, медленно изменяющейся по сравнению с частотой несущей. Известны верхняя и нижняя границы частоты ω несущего сигнала.

Допущение 2. Амплитуда возмущения $\delta(t)$ предполагается существенно меньше амплитуды полезного сигнала, т. е. функции $A(t)$.

Замечание. Следует отметить, что дополнительные ограничения на возмущение $\delta(t)$ будут представлены далее.

Рассмотрим синусоидальный сигнал с нулевым фазовым сдвигом. По аналогии с [4] совместно с измеряемым сигналом (1) рассмотрим запаздывающие сигналы вида

$$y_1(t) = \begin{cases} y(t-d_1), \text{ при } t \geq d_1 \\ 0, \text{ при } t < d_1 \end{cases}, \tag{2}$$

$$y_2(t) = \begin{cases} y(t-d_2), \text{ при } t \geq d_2 \\ 0, \text{ при } t < d_2 \end{cases}, \tag{3}$$

где d_1 и d_2 — известные константы, определяющие величину запаздывания.

Учитывая сигнал $y(t)$ (1) и запаздывания d_1 и d_2, сигналы (2) и (3) запишем в виде

$$\begin{gathered} y_1(t) = A_1(t)\sin(\omega t - \omega d_1) + \delta_1(t) = \\ = A_1(t)k_1\sin(\omega t) + A_1(t)k_2\cos(\omega t) + \delta_1(t), \end{gathered} \tag{4}$$

$$\begin{gathered} y_2(t) = A_2(t)\sin(\omega t - \omega d_2) + \delta_2(t) = \\ = A_2(t)k_3\sin(\omega t) + A_2(t)k_4\cos(\omega t) + \delta_2(t), \end{gathered} \tag{5}$$

где $A_1(t) = A(t - d_1)$; $\delta_1(t) = \delta(t - d_1)$; $A_2(t) = A(t - d_2)$; $\delta_2(t) = \delta(t - d_2)$; $k_1 = \cos(\omega d_1)$; $k_2 = -\sin(\omega d_1)$; $k_3 = \cos(\omega d_2)$; $k_4 = -\sin(\omega d_2)$.

Из сигнала (1), умноженного на $A_1(t)k_1$, вычтем сигнал (4), умноженный на $A(t)$:

$$\begin{gathered} A_1(t)k_1y(t) - A(t)y_1(t) = \\ = -A(t)A_1(t)k_2\cos(\omega t) - A(t)\delta_1(t) + A_1(t)k_1\delta(t). \end{gathered} \tag{6}$$

Из сигнала (1), умноженного на $A_2(t)k_3$, вычтем сигнал (5), умноженный на $A(t)$

$$\begin{gathered} A_2(t)k_3y(t) - A(t)y_2(t) = \\ = -A(t)A_2(t)k_4\cos(\omega t) - A(t)\delta_2(t) + A_2(t)k_3\delta(t). \end{gathered} \tag{7}$$

Из сигнала (6), умноженного на $A_2(t)k_4$ вычтем сигнал (7), умноженный на $A_1(t)k_2$

$$\begin{gathered} (A_1(t)k_1y(t) - A(t)y_1(t))A_2(t)k_4 - \\ - (A_2(t)k_3y(t) - A(t)y_2(t))A_1(t)k_2 = \\ = (-A(t)\delta_1(t) + A_1(t)k_1\delta(t))A_2(t)k_4 - \\ - (-A(t)\delta_2(t) + A_2(t)k_3\delta(t))A_1(t)k_2, \end{gathered}$$

$$\begin{gathered} A_1(t)A_2(t)(k_1k_4 - k_2k_3)y(t) - A(t)A_2(t)k_4y_1(t) + \\ + A(t)A_1(t)k_2y_2(t) = \\ = A_1(t)A_2(t)(k_1k_4 - k_2k_3)\delta(t) - A(t)A_2(t)k_4\delta_1(t) + \\ + A(t)A_1(t)k_2\delta_2(t). \end{gathered} \tag{8}$$

Таким образом, разделив (8) на k_2, имеем

$$A(t)A_1(t)y_2(t) = -A_1(t)A_2(t)\frac{k_1k_4 - k_2k_3}{k_2}y(t) + \\ + A(t)A_2(t)\frac{k_4}{k_2}y_1(t) + \delta_3(t), \qquad (9)$$

где $\delta_3(t) = A_1(t)A_2(t)\frac{k_1k_4 - k_2k_3}{k_2}\delta(t) - A(t)A_2(t)\frac{k_4}{k_2}\delta_1(t) + A(t)A_1(t)\delta_2(t)$ — возмущение.

Примем $d_2 = 2d_1$ и рассмотрим выражения

$$k_1k_4 - k_2k_3 = -\cos(\omega d_1)\sin(\omega d_2) + \sin(\omega d_1)\cos(\omega d_2) = \\ = \sin(\omega d_1 - \omega d_2) = \sin(\omega d_1 - 2\omega d_1) = -\sin(\omega d_1) = k_2,$$

$$\frac{k_1k_4 - k_2k_3}{k_2} = \frac{-\sin(\omega d_1)}{-\sin(\omega d_1)} = 1,$$

$$\frac{k_4}{k_2} = \frac{-\sin(\omega d_2)}{-\sin(\omega d_1)} = \frac{\sin(2\omega d_1)}{\sin(\omega d_1)} = \\ = \frac{2\sin(\omega d_1)\cos(\omega d_1)}{\sin(\omega d_1)} = 2\cos(\omega d_1).$$

С учетом соотношений в выражении (9) имеем

$$A(t)A_1(t)y_2(t) + A_1(t)A_2(t)y(t) = \\ = A(t)A_2(t)2\cos(\omega d_1)y_1(t) + \delta_3(t), \qquad (10)$$

где $\delta_3(t) = A_1(t)A_2(t)\delta(t) - A(t)A_2(t)2\cos(\omega d_1)\delta_1(t) + A(t)A_1(t)\delta_2(t)$.

Тогда выражение (10) можно записать в виде линейной регрессионной модели

$$z(t) = \phi(t)\eta + \delta_3(t), \qquad (11)$$

где $z(t) = A(t)A_1(t)y_2(t) + A_1(t)A_2(t)y(t)$; $\eta = 2\cos(\omega d_1)$; $\phi(t) = A(t)A_2(t)y_1(t)$.

Таким образом, исходная проблема оценивания частоты ω сводится к задаче идентификации параметра η для классической линейной регрессионной модели. Предположительно, для (11) можно применить различные фильтрующие алгоритмы. Однако, как видно из уравнения (10) для $\delta_3(t)$, новое возмущение в (11) представляет сложную нелинейную комбинацию произведения исходного возмущения $\delta(t)$ и его смещенных значений по аргументу t на сигналы $A(t)$, $A_1(t)$ и $A_2(t)$. Следовательно, использование классических подходов, предусматривающих полосовые фильтры, представляется крайне сложной задачей.

В работе [7] предложен метод оценки параметров линейной регрессионной модели при наличии возмущения. Этот метод представляет альтернативу современным алгоритмам фильтрации и основан на некотором нелинейном преобразовании исходного регрессионного уравнения, которое позволяет существенным образом нивелировать влияние возмущения. Основным ограничением использования этого метода является допущение о малости возмущения, выраженной в том, что его амплитуда по модулю меньше единицы. Для понимания возможностей использования метода [7] для представленной в настоящей работе задачи еще раз рассмотрим модель возмущения $\delta_3(t)$ и возможные ограничения.

Рассмотрим функцию

$$\delta_3(t) = A_1(t)A_2(t)\delta(t) - A(t)A_2(t)2\cos(\omega d_1)\delta_1(t) + \\ + A(t)A_1(t)\delta_2(t),$$

модуль которой ограничен согласно следующему выражению

$$|\delta_3(t)| \le |A_1(t)||A_2(t)||\delta(t)| + |A(t)||A_2(t)||2\cos(\omega d_1)||\delta_1(t)| + \\ + |A(t)||A_1(t)||\delta_2(t)|.$$

Введем в рассмотрение величины $A_{\max}$ — максимальное значение $A(t)$ и $\delta_{\max}$ — максимальное значение $\delta(t)$.

Заметим, что переменные $A_1(t)$ и $A_2(t)$ в силу их синтеза посредством сдвига аргумента t на некоторую величину запаздывания ограничены по модулю величиной $A_{\max}$, а $\delta_1(t)$, $\delta_2(t)$ — величиной $\delta_{\max}$. Тогда получим

$$|\delta_3(t)|_{\max} \le 4A_{\max}^2\delta_{\max}$$

и, следовательно, для того чтобы выполнялось $|\delta_3(t)| < 1$, необходимо, чтобы

$$4A_{\max}^2\delta_{\max} < 1.$$

В результате получим условие для амплитуды возмущения $\delta(t)$ и, как следствие, возможность применения подхода [7] для идентификации частоты синусоидального сигнала (1)

$$\delta_{\max} < \frac{1}{4A_{\max}^2}.$$

Ключевой идеей подхода [7], используемого для улучшения точности идентификации параметра η уравнения (11), является применение некоторой нелинейной операции, позволяющий преобразовать первичное регрессионное уравнение с целью уменьшения амплитуды исходного возмущения. Применим нелинейную операцию возведения в целую степень. Перепишем (11) следующим образом

$$(z(t) - \phi(t)\eta) = \delta_3(t). \qquad (12)$$

Для простоты понимания подхода [7] возведем (12) в квадрат и получим новое регрессионное уравнение

$$q = \xi_1\theta_1 + \xi_2\theta_2 + \epsilon, \qquad (13)$$

где $q = z^2$, $\epsilon = (\delta_3)^2$, $\xi_1 = 2z\phi$, $\xi_2 = -\phi^2$, $\theta_1 = \eta$ и $\theta_2 = \eta^2$.

Далее, следуя [7] с использованием метода динамического расширения регрессора и смешивания [8], произведем декомпозицию (13) на скалярные уравнения

$$Y_1 = \Delta\theta_1, \qquad (14)$$

$$Y_2 = \Delta\theta_2, \qquad (15)$$

где Y_1, Y_2 и Δ — некоторые известные функции, полученные в результате применения процедуры динамического расширения регрессора и смешивания [8]. Из (14) и (15), используя градиентные методы идентификации [8], получим оценку неизвестных параметров уравнения (13), включая $\theta_1 = \eta$.

Таким образом, в работе представлен алгоритм оценки неизвестной частоты гармонической несущей измеряемого амплитудно-модулированного сигнала при наличии в измерениях ограниченных возмущений, а также проведен анализ максимально допустимой амплитуды возмущающего воздействия.

Литература

1. Hsu L., Ortega R., Damm G. A globally convergent frequency estimator // IEEE Transactions on Automatic Control. 1999. V. 44. N 4. P. 698–713. https://doi.org/10.1109/9.754808
2. Marino R., Tomei P. Global estimation of n unknown frequencies // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. V. 47. N 8. P. 1324–1328. https://doi.org/10.1109/tac.2002.800761
3. Ведяков А.А., Бобцов А.А., Пыркин А.А. Оценивание параметров синусоидального сигнала с нестационарной амплитудой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 9. С. 812–817. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-9-812-817
4. Vedyakov A.A., Vediakova A.O., Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Aranovskiy S.A. Frequency estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude // IFAC-PapersOnLine. 2017. V. 50. N 1. P. 12880–12885. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1940
5. Ле Ван Туан, Коротина М.М., Бобцов А.А., Арановский С.В. Алгоритм идентификации линейно меняющейся частоты синусоидального сигнала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 52–58. https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-1-52-58
6. Zhao S., Li X.-G., Zhang L.-L. Efficient iterative frequency estimator of sinusoidal signal in noise // Circuits Systems and Signal Processing. 2017. V. 36. N 8. P. 3265–3288. https://doi.org/10.1007/s00034-016-0453-x
7. Bobtsov A., Aranovskiy S., Efimov D., Pyrkin A., Vorobev V., Wang J. Power noise filtration in DREM // Proc. of the European Control Conference (ECC). 2024. P. 2259–2264. https://doi.org/10.23919/ECC64448.2024.10590913
8. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. V. 62. N 7. P. 3546–3550. https://doi.org/10.1109/tac.2016.2614889

References

1. Hsu L., Ortega R., Damm G. A globally convergent frequency estimator. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, vol. 44, no. 4, pp. 698–713. https://doi.org/10.1109/9.754808
2. Marino R., Tomei P. Global estimation of n unknown frequencies. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, vol. 47, no. 8, pp. 1324–1328. https://doi.org/10.1109/tac.2002.800761
3. Vedyakov A.A., Bobtsov A.A., Pyrkin A.A. Parameters estimation of a sinusoidal signal with non-stationary amplitude. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 812–817. (in Russian). https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-9-812-817
4. Vedyakov A.A., Vediakova A.O., Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Aranovskiy S.A. Frequency estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 12880–12885. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1940
5. Le Van Tuan, Korotina M.M., Bobtsov A.A., Aranovskiy S.V. New identification algorithm for linearly varying frequency of sinusoidal signal. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 52–58 (in Russian). https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-1-52-58
6. Zhao S., Li X.-G., Zhang L.-L. Efficient iterative frequency estimator of sinusoidal signal in noise. *Circuits Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 36, no. 8. pp. 3265–3288. https://doi.org/10.1007/s00034-016-0453-x
7. Bobtsov A., Aranovskiy S., Efimov D., Pyrkin A., Vorobev V., Wang J. Power noise filtration in DREM. *Proc. of the European Control Conference (ECC)*, 2024, pp. 2259–2264. https://doi.org/10.23919/ECC64448.2024.10590913
8. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550. https://doi.org/10.1109/tac.2016.2614889

Авторы

Бобцов Алексей Алексеевич — доктор технических наук, профессор, директор мегафакультета, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 8046819200, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717, bobtsov@itmo.ru

Оськина Ольга Владимировна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 57353555800, https://orcid.org/0009-0005-5121-0432, ov_oskina@itmo.ru

Слита Ольга Валерьевна — кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, Технион — Израильский технологический институт, Хайфа, 3200003, Израиль, sc 16242570700, https://orcid.org/0000-0001-7119-3629, o-slita@yandex.ru

Николаев Николай Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, приглашенный доцент, Технион — Израильский технологический институт, Хайфа, 3200003, Израиль, sc 13105019100, https://orcid.org/0000-0002-8835-5142, nikona@yandex.ru

Бойцев Антон Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, sc 56401063400, https://orcid.org/0000-0002-3374-8256, boitsevanton@itmo.ru

Authors

Alexey A. Bobtsov — D.Sc., Professor, Head of School of Computer Technologies and Control, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 8046819200, https://orcid.org/0000-0003-1854-6717, bobtsov@itmo.ru

Olga V. Oskina — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 57353555800, https://orcid.org/0009-0005-5121-0432, ov_oskina@itmo.ru

Olga V. Slita — PhD, Associate Professor, Scientific Researcher, Technion — Israel Institute of Technology, Haifa, 3200003, Israel, sc 16242570700, https://orcid.org/0000-0001-7119-3629, o-slita@yandex.ru

Nikolay A. Nikolaev — PhD, Associate Professor, Visiting Associate Professor, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, 3200003, Israel, sc 13105019100, https://orcid.org/0000-0002-8835-5142, nikona@yandex.ru

Anton A. Boitsev — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, sc 56401063400, https://orcid.org/0000-0002-3374-8256, boitsevanton@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 14.10.2025
Одобрена после рецензирования 11.11.2025
Принята к печати 19.01.2026

Received 14.10.2025
Approved after reviewing 11.11.2025
Accepted 19.01.2026