

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛИНОРЕМЕННОГО МОТОР-ВАРИАТОРА

К.Т.Н. Баловнев Н.П., Дмитриева Л.А.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

dm@mami.ru

Для изменения скорости исполнительных органов многих современных машин используют различные бесступенчатые приводы, в том числе довольно широко клиноременные вариаторы, имеющие ряд существенных преимуществ. Основным недостатком последних является относительно невысокий ресурс вариаторного ремня, обусловленный, как правило, не только качеством самого ремня, но и несовершенством конструкции нажимных устройств вариатора. Поэтому повышение технических характеристик современных клиноременных вариаторов является важной и актуальной задачей. В статье показаны необходимость и пути усовершенствования клиноременных вариаторов общепромышленного применения. Проанализирована конструкция модернизированных мотор-вариаторов и их нажимных устройств. Показаны основные достоинства усовершенствованных нажимных устройств рассматриваемых мотор-вариаторов. Отмечены конструктивные недостатки механизма регулировки нажимного устройства ведущего шкива. Для оценки возможностей модернизированных мотор-вариаторов проведен расчетно-экспериментальный анализ его макетного образца. Расчетным путем найден ожидаемый ресурс вариаторного ремня, показавший имеющийся значительный запас по нагрузочной способности мотор-вариатора. Экспериментально определена теплонагруженность не только клинового ремня, но и других элементов вариатора при различных режимах нагружения, в том числе экстремального. По результатам расчетно-экспериментального анализа установлено, что технические характеристики модернизированного мотор-вариатора не отражают его действительных возможностей. Мотор-вариатор способен передавать большие мощности без потери его работоспособности. Модернизированный мотор-вариатор можно использовать в приводах стационарных машин при различных законах изменения момента сопротивления и передаваемой мощности. Однако следует провести конструктивную доработку мотор-вариатора и его нажимных устройств с целью устранения дополнительных источников теплообразования и улучшения условий работы вариаторного ремня.

Ключевые слова: мотор-вариатор, вариаторный ремень, нажимное устройство, ресурс, нагрузка, теплонагруженность.

Введение

Многие современные машины требуют изменения скорости исполнительного органа в широком диапазоне, причем зачастую плавно, без резких скачков. Поэтому механические, в частности, клиноременные вариаторы не потеряли своей актуальности.

Клиноременные вариаторы общепромышленного применения обычно имеют два регулируемых шкива. Нажимное устройство ведомого шкива традиционно имеет пружинное нажатие [1]. Это не позволяет максимально реализовать силовые характеристики вариатора и ресурс ремня, так как в приводах большинства современных машин передаваемая нагрузка меняется в значительных пределах, и вариаторный ремень при частичных нагрузках оказывается перетянут. Коэффициент полезного действия самого вариатора при таких нагрузках пониженный. Следовательно, для улучшения эксплуатационных характеристик

вариаторов общепромышленного применения целесообразно модернизировать вариаторы, применяя прогрессивные нажимные устройства, обеспечивающие натяжение ремня пропорционально передаваемой нагрузке.

Модернизация мотор-вариатора

При создании модернизированных мотор-вариаторов ВР 315А с двигателем мощностью 7,5 кВт и ВР 315Б с двигателем мощностью 3,0 кВт взамен устаревших ВР-1 и ВР-3 была разработана конструкция нажимного устройства ведомого шкива, обеспечивающая автоматическое натяжение ремня пропорционально моменту сопротивления на ведомом валу, т.е. пропорционально передаваемой нагрузке.

Это позволяет применять такие вариаторы в приводах любых стационарных машин как с характеристикой, обеспечивающей постоянный момент при изменении скорости вращения вала рабочего органа, так и постоянство передаваемой

мощности, или в других условиях [2, 3], т.е. фактически вариатор становится универсальным.

Такой подход исключает чрезмерное натяжение ремня, а следовательно, увеличивает ресурс последнего, обеспечивает унификацию нажимных устройств для всего типажа вариаторов.

Автоматическое натяжение ремня пропорциональное моменту сопротивления в нажимном устройстве обеспечивается кулачковым механизмом. Аналогичный механизм широко используется в вариаторах легких транспортных средств (мотонарт, мотороллеров и т.д.) [4, 5] и зерноуборочных комбайнов [6, 7].

В модернизированных мотор-вариаторах направляющие скольжения нажимного устройства заменены на направляющие качения, что увеличивает чувствительность вариатора, а также его коэффициент полезного действия. Конструкция направляющих исключает поворот подвижного диска шкива вариатора относительно неподвижного в процессе осевого перемещения при изменении передаточного отношения вариатора, что, в свою очередь, уменьшает вероятность неравномерной вытяжки ремня и его переворачивания во время регулирования. Подобный недостаток характерен для большинства конструкций клиноременных вариаторов.

Для оценки возможностей модернизированных мотор-вариаторов был проведен расчетно-экспериментальный анализ макетного образца мотор-вариатора ВР 315Б, препарированный образец которого представлен на рис. 1.



Рис. 1. Препарированный макетный образец мотор-вариатора ВР 315Б

Паспортные характеристики мотор-вариатора ВР 315Б основаны на ГОСТ 24848.3-81 [8]: номинальная мощность на входном валу –

$P_1 = 3,0$ кВт; синхронная частота вращения двигателя – $n_1 = 1500$ мин⁻¹; передаточные отношения – $i_{\max} = 2$, $i_{\min} = 0,5$; диапазон регулирования симметричный – $D = 4$; номинальная мощность на выходном валу при максимальной частоте вращения $n_{2\max} = 2900$ мин⁻¹ – $P_2 = 2,8$ кВт; при минимальной частоте вращения $n_{2\min} = 725$ мин⁻¹ – $P_2 = 1,2$ кВт; вращающий момент на выходном валу T_2 при $n_{2\max}$ не менее 9,4 Н·м, при $n_{2\min}$ – 16 Н·м.

Характеристики указаны для непрерывного режима работы с постоянной нагрузкой длительностью 8 часов в сутки. Они соответствуют вариатору с пружинным поджатием подвижного диска ведомого шкива, когда передаваемая мощность ограничена возможностью полного буксования ремня из-за снижения усилия пружины в процессе перемещения подвижного диска шкива при регулировании вариатора. Вариатор с модернизированным нажимным устройством может создавать требуемое осевое усилие, как при мощности 3 кВт, так и при мощности 7,5 кВт. Это позволяет мотор-вариатору ВР 315Б реализовать все мощностные возможности двигателя на всем диапазоне регулирования при сохранении нагрузочной способности вариаторного ремня с учетом его ресурса. Нагрузочная способность вариатора ограничивается возможностями наиболее слабого элемента – вариаторного ремня.

Для оценки нагрузочной способности модернизированного мотор-вариатора был определен ожидаемый ресурс вариаторного ремня.

Ожидаемый ресурс ремня вариатора ВР 315Б был найден расчетным путем в соответствии с РТМ 38.405-51/3-2-6-90 «Ремни клиновые вариаторные для промышленного оборудования. Расчет передач и передаваемые мощности», разработанного МАМИ совместно с Загорским филиалом ВНИИЭМИ.

Ресурс определен для двух режимов работы мотор-вариатора (табл. 1). Режим нагружения № 1 по моменту на выходном T_2 валу соответствует паспортным данным исследуемого мотор-вариатора. Момент на ведомом валу T_2 для режима № 2 соответствует полной нагрузке электродвигателя по мощности. Относительное время работы $\tau_i = t_i / L_i$ на различных ступенях блока нагружения мотор-вариатора принято для всех режимов одинаковым. Это соответствует режиму близкому к равновероятностному [9].

Таблица 1

Режимы нагружения мотор-вариатора, момент на выходном валу T_{2i} , передаточное отношение вариатора i_i , относительное время работы τ_i

Режим № 1			Режим № 2		
T_{2i} , Н·м	i_i	τ_i	T_{2i} , Н·м	i_i	τ_i
16	2	0,3	34	2	0,3
12,5	1	0,4	18	1	0,4
9,4	0,5	0,3	9,4	0,5	0,3

Расчет показал, что ожидаемый ресурс ремня с учетом его температуры, принятой в расчетах $t = 50$ °С по результатам предварительных испытаний, составил $L_{h1} = 12500$ часов для режима № 1 и $L_{h2} = 7600$ часов для режима № 2. Как видно, величина ожидаемого ресурса ремня весьма значительная (средний ресурс ремней в эксплуатации по ГОСТ 24848.2-81 составляет не менее 2500 часов для легкого режима работы). Это подтверждает предположение о том, что паспортные данные не отражают действительных возможностей модернизированного мотор-вариатора. Мотор-вариатор способен передавать большие мощности без потери работоспособности.

Испытания макетного образца мотор-вариатора

Натурные испытания макетного образца мотор-вариатора и ВР 315Б на предприятии-изготовителе показали его излишнюю теплонагруженность [1]. Поэтому были проведены дополнительные экспериментальные исследования для определения источников повышенного теплообразования и оценки теплонагруженности вариаторного ремня. На рис. 2

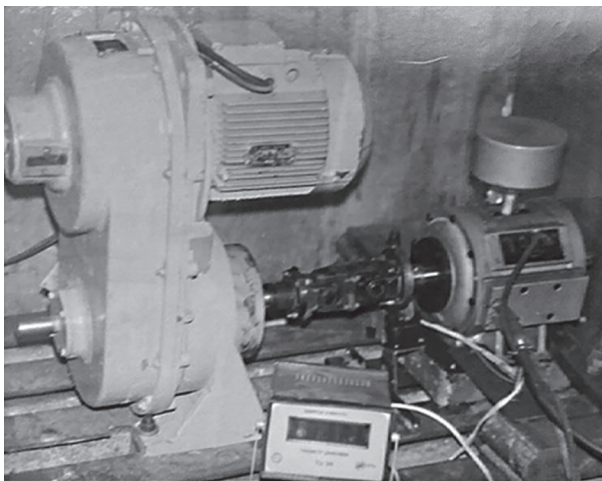


Рис. 2. Испытательный стенд

показан испытательный стенд, состоящий из вариатора ВР 315Б и порошкового тормоза ПТ-16М, соединенного с ведомым валом вариатора карданной передачей.

Испытания проводились в двух режимах, соответствующих работе вариатора паспортным данным (режим № 1) и полной загрузке электродвигателя по мощности (режим № 2).

Режим № 1: частота вращения выходного вала $n_2 = 1200$ мин⁻¹; тормозной момент $T_2 = 20$ Н·м. Режим № 2: частота вращения выходного вала $n_2 = 2100$ мин⁻¹; тормозной момент $T_2 = 15$ Н·м.

При этом режим № 2 соответствовал перегрузке электродвигателя до 3,5 кВт при его номинальной мощности 3 кВт.

Тормозной момент T_2 контролировался силовым измерительным устройством порошкового тормоза. Частота вращения ведомого вала вариатора определялась цифровым тахометром ТЦ-3М. Температура измерялась прибором В7/27 с помощью контактной термопары при остановленном вариаторе в восьми точках: точка № 1 – вариаторный ремень; точка № 2 – диск нижний левый; точка № 3 – диск верхний правый; точка № 4 – механизм регулировки; точка № 5 – корпус электродвигателя; точка № 6 – корпус вариатора; точка № 7 – вал входной левый; точка № 8 – вал входной правый. Замер во внутренних точках (№ 5, № 6, № 7 и № 8) осуществлялся через технологические смотровые люки корпуса мотор-вариатора. Результаты измерений в графическом виде приведены на рис. 3 и 4.

Анализ результатов эксперимента показал, что ремень не является основным источником теплообразования, хотя его температура достигала $t = 58,1$ °С. Такая температура допустима для ремня. Однако, имеющаяся, по нашему мнению, возможность ее снижения за счет доработки конструкции корпуса, вентилятора и нажимных устройств мотор-вариатора положительно скажется на ресурсе ремня.

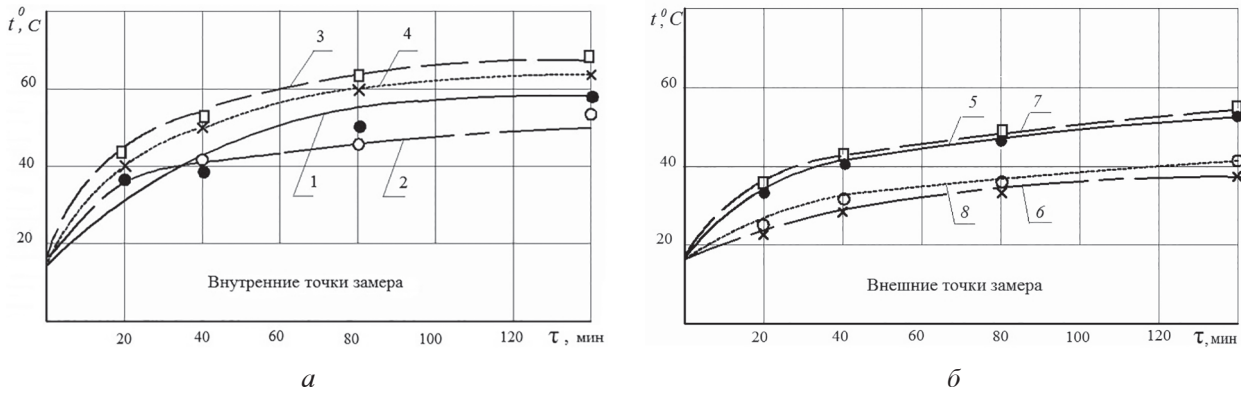


Рис. 3. График изменения температуры в режиме № 1:
a – внутренние точки замера; *б* – внешние точки замера

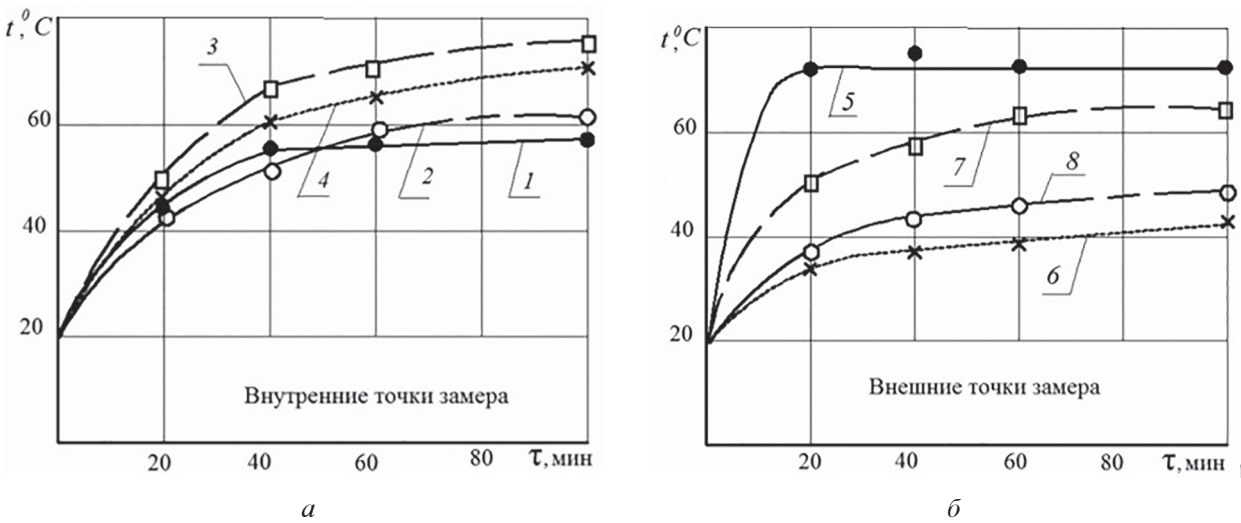


Рис. 4. График изменения температуры в режиме № 2:
a – внутренние точки замера; *б* – внешние точки замера

Наиболее значимым источником теплообразования является механизм регулировки нажимного устройства ведущего шкива. Этот узел, несомненно, требует тщательной конструктивной доработки. Нагрев корпуса электродвигателя до температуры $t = 71...76^{\circ}\text{C}$ не является опасным, поскольку проявляется лишь в режиме № 2, когда электродвигатель работал в режиме перегрузки. В нормальном режиме (режим № 1) его температура находилась в допустимых пределах.

Повышенная температура верхнего правого диска (точка № 3), вероятнее всего, обусловлена большим тепловыделением в механизме регулировки и в электродвигателе. Она может быть снижена после доработки механизма регулировки. Заслуживает пристального внимания значительная разница температур левого и правого концов выходного вала. Такая разница вызвана конструктивно-технологическими погрешностями механизма нажатия ведомого шкива и

правой опоры ведомого вала. Этот узел также требует соответствующей доработки.

Тепловой расчет вариатора производился по традиционной методике для установившегося режима работы [10]. При этом рассчитывалась температура корпуса вариатора и корпуса электродвигателя.

Средняя температура корпуса вариатора определялась по выражению:

$$t_{\text{var}} = t_0 + \frac{1000 \cdot P \cdot (1 - \eta_{\text{var}})}{K \cdot A} = 20 + \frac{1000 \cdot 3 \cdot (1 - 0,917)}{12 \cdot 0,7} = 43,1^{\circ}\text{C}.$$

Здесь t_0 – температура окружающей среды (принято $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$); P – мощность электродвигателя, кВт; A – площадь поверхности корпуса вариатора, м^2 ; K – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{градус})$; η_{var} – коэффициент полезного действия вариатора.

Коэффициент полезного действия вариатора найден расчетным путем, по методике, изложенной в [10]. Расчет проводился для $i = 0,5$ и $i = 1$ при полной реализации мощности электродвигателя. Его величина составила: при $i = 0,5$, $\eta_{\text{var}} = 0,917$, при $i = 1$ – $\eta_{\text{var}} = 0,935$. Расчет проведен при меньшем значении коэффициента полезного действия мотор-вариатора.

Средняя температура корпуса электродвигателя определялась по формуле:

$$t_d = t_0 + \frac{1000 \cdot P \cdot (1 - \eta_{\text{var}})}{\eta_d \cdot K_0 \cdot A_0} =$$

$$= 20 + \frac{1000 \cdot 3 \cdot (1 - 0,917)}{0,85 \cdot 37 \cdot 0,18} = 98,2^\circ \text{C}.$$

Здесь η_d – коэффициент полезного действия электродвигателя (принят $\eta_d = 0,85$); A_0 – площадь поверхности корпуса электродвигателя, м²; $K_0 \approx \sqrt{n_1} = \sqrt{1420} = 37$ Вт/(м²·градус) коэффициент теплоотдачи в окружающую среду.

Из расчетов видно, что ожидаемая температура корпуса мотор-вариатора практически совпадает с замеренной экспериментально, а корпуса электродвигателя – превышает замеренную. Это можно объяснить недостаточной точностью определения коэффициента K_0 и упрощенностью методики расчета.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Технические характеристики модернизированного мотор-вариатора не отражают его действительных возможностей. Мотор-вариатор способен передавать большие мощности без потери работоспособности.

2. Модернизированный мотор-вариатор можно использовать в приводах стационарных машин при различных законах изменения момента сопротивления и передаваемой мощности.

3. Следует провести доработку конструкции мотор-вариатора с целью устранения дополнительных источников теплообразования и улучшения условий работы вариаторного ремня.

Литература

1. Баловнев Н.П. Модернизация вариатора общемашиностроительного применения. / Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Новосибирск, 12 марта 2018 г.) /

в 2 ч. Ч. 2. Стерлитамак: АМИ, 2018. С. 93–97.

2. Баловнев Н.П., Дмитриева Л.А., Семин И.Н. Экспериментальная оценка тяговой способности ременных передач с различными способами натяжения ремня. // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 1. № 2 (14). С. 23–29.
3. Баловнев Н.П., Дмитриева Л.А., Семин И.Н. Результаты сравнительных испытаний клиноременных передач с различными способами натяжения ремней. // Автомобильная промышленность. 2013. № 5. С. 19–21.
4. Баловнев Н.П., Вавилов П.Г. Пути совершенствования механического привода генератора электроснабжения пассажирского вагона. // Известия МГТУ «МАМИ». 2007. № 2 (4). С. 76–78.
5. Баловнев Н.П., Власенко С.А. О скольжении ремня в процессе регулирования вариатора. // Автомобильная промышленность. 2007. № 2. С. 17–21.
6. Баловнев Н.П., Дмитриева Л.А. Расчет клиноременных передач сельхозмашин с автоматическим натяжением ремня. // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 9. С. 39–41.
7. Флик Э.П., Баловнев Н.П., Вяткин А.А., Бассаман А.Е. Ускоренные испытания механических приводов зернокомбайнов на автономных стендах // Тракторы и сельхозмашины. 1987. № 9. С. 22–25.
8. ГОСТ 24848.3-81 Ремни клиновые вариаторные для промышленного оборудования. Расчет передач и передаваемые мощности. М.: Издательство стандартов, 1993. 9 с.
9. Баловнев Н.П., Пронин Б.А. Расчет цилиндрических зубчатых передач: учебное пособие / Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ). М. 2006. 53 с.
10. Лукьянов А.С., Чихачева О.А., Баловнев Н.П. Тетрадь для лекционных и семинарских занятий по курсу «Детали машин и основы конструирования». М. 2015.

References

1. Balovnev N.P. Modernization of the variator for general mechanical engineering. *V sbornike: Sovremennye problemy i perspektivnye napravleniya innovacionnogo razvitiya nauki. Sbornik statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Novosibirsk, 12 marta 2018 g.)* [In papers collection: Modern problems and promising directions of innovative development of science. Collection of articles on the results of the International scientific-practical conference (Novosibirsk, March 12, 2018)]. V 2 ch. CH. 2. Sterlitamak: AMI Publ., 2018, pp. 93–97 (in Russ.).

2. Balovnev N.P., Dmitrieva L.A., Semin I.N. Experimental evaluation of traction ability of belt drives with different ways of belt tension. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2012. Vol. 1. No 2 (14), pp. 23–29 (in Russ.).
3. Balovnev N.P., Dmitrieva L.A., Semin I.N. Results of comparative tests of V-belt transmissions with different methods of belt tension. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2013. No 5, pp. 19–21 (in Russ.).
4. Balovnev N.P., Vavilov P.G. Ways of improvement of the mechanical drive of the generator of power supply of the passenger carriage. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2007. No 2(4), pp. 76–78 (in Russ.).
5. Balovnev N.P., Vlasenko S.A. Slip of the belt during the regulation of the variator. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2007. No 2, pp. 17–21 (in Russ.).
6. Balovnev N.P., Dmitrieva L.A. Calculation of V-belt drives of agricultural machines with automatic belt tension. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2014. No 9, pp. 39–41 (in Russ.).
7. Flik E.H.P., Balovnev N.P., Vyatkin A.A., Bassaman A.E. Accelerated testing of mechanical drives of combines on autonomous test benches. *Traktory i sel'hozmashiny*. 1987. No 9, pp. 22–25 (in Russ.).
8. GOST 24848.3-81 Remni klinovye variatornyye dlya promyshlennogo oborudovaniya. *Raschet peredach i peredavaemye moshchnosti* [V-belts for industrial equipment. The calculation of transmission and the transmitted power]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1993. 9 p.
9. Balovnev N.P., Pronin B.A. *Raschet cilindricheskikh zubchatykh peredach* [Calculation of cylindrical gears]. Uchebnoe posobie. Moskovskij gosudarstvennyj mashinostroitel'nyj universitet (MAMI) Publ. Moscow. 2006. 53 p.
10. Luk'yanov A.S., Chihacheva O.A., Balovnev N.P. *Tetrad' dlya lekcionnykh i seminarских zanyatij po kursu «Detali mashin i osnovy konstruirovaniya»* [Notebook for lectures and seminars for discipline "Machine parts and design basics"]. Moscow. 2015.

CALCULATION AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE V-BELT VARIATOR MOTOR

Ph.D. **N.P. Balovnev, L.A. Dmitrieva**
 Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
 dm@mami.ru

To change the speed of the executive bodies of many modern machines it is commonly used a variety of continuously variable drives, including, quite broadly, V-belt variators, which have a number of significant advantages. The main disadvantage of them is having not high durability of the variable-speed belt, caused, as a rule, not only by the qualities of the belt itself, but also by not perfect design of variator pressure devices. Therefore, improving the technical characteristics of modern V-belt variators is an important and urgent task. The article shows the need and ways to improve the V-belt variators for industrial use. The design of the upgraded motor variators and their pressure devices is analyzed. The main advantages of the improved pressure devices of the considered motor-variators are shown. The design flaws of the drive pulley adjustment mechanism are noted. To assess the capabilities of the upgraded motor-variators, a computational-experimental analysis of its prototype was carried out. The expected durability of the variator belt was found by calculation, which showed a significant reserve of the motor-variator in terms of load capacity. There was heat load experimentally determined of the V-belt and other elements of the variator under different loading conditions, including extreme loads. According to the results of the calculation and experimental analysis, it was found that the technical characteristics of the modernized variator do not reflect its actual capabilities. The variator motor is able to transmit high power without losing its efficiency. The upgraded variator motor can be used in the drives of stationary machines with different laws of change of the moment of resistance and transmitted power. However, it is necessary to carry out a constructive revision of the variator motor and its pressure devices in order to eliminate additional sources of heat generation and improve the working conditions of the variator belt.

Keywords: variator motor, variator belt, pressure device, durability, load, heat load.